

Rafael Roberto Roman

# **Otimização de Coberturas Metálicas de Edifícios Industriais**

Florianópolis

2016



Rafael Roberto Roman

# **Otimização de Coberturas Metálicas de Edifícios Industriais**

Trabalho de conclusão de curso submetido ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Engenheiro Civil

Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Centro Tecnológico - CTC

Departamento de Engenharia Civil - ECV

Orientador: Rafael Holdorf Lopez

Florianópolis

2016

---

Rafael Roberto Roman

Otimização de Coberturas Metálicas de Edifícios Industriais/ Rafael Roberto Roman. – Florianópolis, 2016-

132 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Rafael Holdorf Lopez

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC  
Centro Tecnológico - CTC

Departamento de Engenharia Civil - ECV, 2016.

1. Engenharia Civil. 2. Otimização de Coberturas. 3. Edifícios Industriais. 4. SGA. I. Rafael Holdorf Lopez. II. Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC. III. Graduação em Engenharia Civil. IV. Título


---

Rafael Roberto Roman

## **Otimização de Coberturas Metálicas de Edifícios Industriais**

Trabalho de conclusão de curso submetido ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Engenheiro Civil

Trabalho aprovado. Florianópolis, 22 de novembro de 2016:



---

**Prof. Rafael Holdorf Lopez, Dr.**  
Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

**Prof. Leandro Fleck Fadel Miguel, Dr.**  
Universidade Federal de Santa Catarina

**Rafael Rodrigues de Souza, Me.**  
Universidade Federal de Santa Catarina

Florianópolis  
2016



# Agradecimentos

À Rafael Holdorf Lopez, Leandro Fleck Fadel Miguel e Rafael Rodrigues de Souza pelas dicas e orientações durante o trabalho.

À Daniel Melo do Nascimento e Nilana Rodrigues de Souza pelas cotações de perfis em aço.

Ao professor Cláudio Cesar Zimmermann e ao membros do Programa de Educação Tutorial do Curso de Engenharia Civil, em especial aos *PETbrothers* Eduardo Deuschle e Eduardo José Mendes pelas lições de vida, parceria e amizade durante toda a graduação.

Aos meus pais, Dulceni e Nelso, ao meu irmão Rodrigo e à minha namorada Ana pelo carinho, suporte e apoio.

À todos que, de uma forma ou outra, contribuíram para a minha formação.





# Resumo

Este trabalho apresenta a otimização do custo e dimensionamento da cobertura em aço de um edifício industrial. O procedimento baseia-se em encontrar os perfis para as telhas, terças, tirantes, travamentos e elementos utilizados em pórticos, como também o número de terças e travamentos e o espaçamento entre pórticos mais adequado de modo a gerar a cobertura com o menor custo. Para tanto, foi utilizado o algoritmo genético *Search Group Algorithm (SGA)*, realizando simultaneamente otimização dimensional, geométrica e topológica da estrutura. O dimensionamento seguiu os critérios das normas [ABNT NBR 6123 \(1988\)](#) – Forças devidas ao vento em edificações e [ABNT NBR 8800 \(2008\)](#) – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Foram considerados três modelos de cobertura e, para cada modelo, o edifício industrial foi dimensionado e otimizado para diversas larguras. Assim, foi possível comparar o desempenho dos modelos em relação ao custo e definir qual modelo é mais indicado para determinada largura.

**Palavras-chaves:** otimização. edifício industrial. galpões em aço. *Search Group Algorithm*.



# Abstract

This paper presents the cost optimization and design of steel roofing structures for single-storey industrial buildings. This procedure is based on find tiles, purlins, risers, bracings and beams or trusses, as well as the spacing between portal frames in order to generate the roofing with the least cost. To do so, is used the genetic algorithm *Search Group Algorithm (SGA)* performing simultaneously size, shape and topology optimization of the structure. The design followed the criteria of [ABNT NBR 6123 \(1988\)](#) - Building construction - Bases for design of structures - Wind loads - Procedure and [ABNT NBR 8800 \(2008\)](#) - Design of steel and composite structures for buildings. Where considered three roofing models and, for each model, the industrial building was designed and optimized for several spans. Thus, it was possible to compare the performance of the models in order to define which one is more suitable for determined width.

**Key-words:** design and cost optimization. industrial steel building. *Search Group Algorithm*.



# Lista de ilustrações

Figura 1 – Tipos de otimização estrutural. . . . .	20
Figura 2 – Tipos básicos de galpões. . . . .	26
Figura 3 – Galpão geminado com duas meias-águas. . . . .	26
Figura 4 – Galpão em Shed com pórticos em perfis I, vigas mestras e secundárias em treliças. . . . .	27
Figura 5 – Galpão em arco. . . . .	27
Figura 6 – População inicial gerada aleatoriamente em um domínio bidimensional. . . . .	34
Figura 7 – População inicial: quanto mais for o círculo, melhor é a função objetivo do indivíduo. . . . .	34
Figura 8 – Grupo de Busca inicial composto por cinco membros da população inicial. . . . .	34
Figura 9 – Mutação do Grupo de Busca. . . . .	35
Figura 10 – Grupo de busca (a) e Família (b) para as primeiras iterações do SGA . . . . .	36
Figura 11 – Grupo de busca (a) e Família (b) para as últimas iterações do SGA . . . . .	36
Figura 12 – Pseudo-código do <i>SGA</i> . . . . .	38
Figura 13 – Estruturas de sustentação utilizadas. . . . .	40
Figura 14 – Tirantes nas terças. . . . .	44
Figura 15 – Formato dos tirantes e área de influência. . . . .	45
Figura 16 – Tirantes em X. . . . .	45
Figura 17 – Direções dos Esforços de Vento – Vista superior. . . . .	50
Figura 18 – Graus de liberdade de uma treliça plana. . . . .	54
Figura 19 – Graus de liberdade de um pórtico plano. . . . .	55
Figura 20 – Modelos de cobertura do galpão - dimensões em metros. . . . .	58
Figura 21 – Vista superior dos três modelos - dimensões em metros. . . . .	59
Figura 22 – Vista em corte do modelo 1. . . . .	59
Figura 23 – Vista em perspectiva do modelo 1. . . . .	60
Figura 24 – Vista em corte do modelo 2. . . . .	62
Figura 25 – Vista em perspectiva do modelo 2. . . . .	63
Figura 26 – Vista em corte do modelo 3. . . . .	65
Figura 27 – Vista em perspectiva do modelo 3. . . . .	66
Figura 28 – Topologias utilizadas para o modelo 3. . . . .	67
Figura 29 – Número de terças e seu respectivo custo para cada vão - Modelo 1 . . . . .	70
Figura 30 – Custo em reais para cada elemento - Modelo 1 . . . . .	71
Figura 31 – Custo percentual de cada elemento - Modelo 1 . . . . .	71
Figura 32 – Número de terças e seu respectivo custo para cada vão - Modelo 2 . . . . .	72
Figura 33 – Custo em reais para cada elemento - Modelo 2 . . . . .	73
Figura 34 – Custo percentual de cada elemento - Modelo 2 . . . . .	73

Figura 35 – Número de terças e seu respectivo custo para cada vão - Modelo 3 . . . .	74
Figura 36 – Custo em reais para cada elemento - Modelo 3 . . . . .	75
Figura 37 – Custo percentual de cada elemento - Modelo 3 . . . . .	75
Figura 38 – Custo comparativo das telhas . . . . .	76
Figura 39 – Custo dos travamentos do banzo inferior da treliça . . . . .	77
Figura 40 – Custo das terças . . . . .	77
Figura 41 – Custo dos tirantes em X . . . . .	78
Figura 42 – Custo dos tirantes em Y . . . . .	78
Figura 43 – Custo dos pórticos . . . . .	79
Figura 44 – Inclinação do telhado . . . . .	79
Figura 45 – Espaçamento entre pórticos para cada modelo . . . . .	80
Figura 46 – Comparação do custo da cobertura entre modelos . . . . .	80
Figura 47 – Massa da cobertura para otimização da massa e do custo para os modelos	82
Figura 48 – Custo da cobertura para otimização da massa e do custo para os modelos	82
Figura 49 – Massa da cobertura para espaçamento entre pórticos constante e variável para os modelos . . . . .	83
Figura 50 – Custo da cobertura para espaçamento entre pórticos constante e variável para os modelos . . . . .	84
Figura 51 – Largura e espessura da alma do perfil I. . . . .	98
Figura 52 – Largura e espessura da mesa do perfil I. . . . .	99
Figura 53 – Largura e espessura das abas para o perfil cantoneira simples e duplo. .	107
Figura 54 – Seção Típica – Cantoneira de Abas Iguais. . . . .	113
Figura 55 – Seção Típica – Perfil I. . . . .	114
Figura 56 – Seção Típica – Perfil U formado a frio. . . . .	117
Figura 57 – Seção Típica – Barra Redonda Trefilada. . . . .	118
Figura 58 – Seção Típica – Telha Trapezoidal 40. . . . .	118
Figura 59 – Numeração das barras das diagonais e montantes da treliça . . . . .	128
Figura 60 – Galpão otimizado - Modelo 1 . . . . .	131
Figura 61 – Galpão otimizado - Modelo 2 . . . . .	132
Figura 62 – Galpão otimizado - Modelo 3 . . . . .	132

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Propriedades do aço das terças, tirantes, contraventamentos, travamentos e treliças e vigas <sup>1</sup> . . . . .	47
Tabela 2 – Propriedades do aço para as vigas <sup>2</sup> . . . . .	47
Tabela 3 – Variáveis de projeto para o modelo 1 . . . . .	57
Tabela 4 – Opções de espaçamento e número de pórticos . . . . .	61
Tabela 5 – Variáveis de projeto para o modelo 2 . . . . .	63
Tabela 6 – Variáveis de projeto para o modelo 3 . . . . .	65
Tabela 7 – Comparação entre a otimização da massa e do custo para os modelos .	81
Tabela 8 – Comparação entre o espaçamento entre pórticos constante e variável para os modelos . . . . .	83
Tabela 9 – Perfis cantoneira de abas iguais . . . . .	114
Tabela 10 – Perfis laminado tipo I . . . . .	115
Tabela 11 – Perfis laminado tipo I . . . . .	116
Tabela 12 – Perfis tipo U formado a frio . . . . .	117
Tabela 13 – Perfis de Barras Redondas Trefiladas – Tirantes em Y e Tirantes em X	118
Tabela 14 – Tabela de Cargas Admissíveis ( $N/m^2$ ) . . . . .	119
Tabela 15 – Resultados para o modelo 1 - Índice das variáveis . . . . .	121
Tabela 16 – Resultados para o modelo 1 - Massas totais . . . . .	122
Tabela 17 – Resultados para o modelo 1 - Custos totais . . . . .	123
Tabela 18 – Resultados para o modelo 2 - Índice das variáveis . . . . .	124
Tabela 19 – Resultados para o modelo 2 - Massas totais . . . . .	125
Tabela 20 – Resultados para o modelo 2 - Custos totais . . . . .	126
Tabela 21 – Resultados para o modelo 3 - Índice das barras da treliça . . . . .	127
Tabela 22 – Resultados para o modelo 3 - Índice das variáveis . . . . .	128
Tabela 23 – Resultados para o modelo 3 - Massas totais . . . . .	129
Tabela 24 – Resultados para o modelo 3 - Custos totais . . . . .	130





# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>19</b>
<b>1.1</b>	<b>Generalidades</b>	<b>19</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos</b>	<b>23</b>
1.2.1	Objetivos Gerais	23
1.2.2	Objetivos Específicos	23
<b>1.3</b>	<b>Método</b>	<b>23</b>
<b>1.4</b>	<b>Organização do Trabalho</b>	<b>24</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b>	<b>25</b>
<b>2.1</b>	<b>Estruturas em aço</b>	<b>25</b>
<b>2.2</b>	<b>Otimização de estruturas</b>	<b>28</b>
<b>3</b>	<b>PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO</b>	<b>31</b>
<b>3.1</b>	<b>Apresentação do Algoritmo Otimizador SGA</b>	<b>32</b>
3.1.1	Funcionamento do SGA	33
3.1.2	População Inicial	33
3.1.3	Seleção do Grupo de Busca inicial	33
3.1.4	Mutação do Grupo de Busca	35
3.1.5	Geração das Famílias	35
3.1.6	Seleção do novo Grupo de Busca	37
3.1.7	Parâmetros de entrada	37
3.1.8	Pseudo-código do SGA	38
<b>4</b>	<b>CONCEPÇÃO ESTRUTURAL E DIMENSIONAMENTO</b>	<b>39</b>
<b>4.1</b>	<b>Vigas</b>	<b>39</b>
<b>4.2</b>	<b>Treliças</b>	<b>41</b>
<b>4.3</b>	<b>Telhas</b>	<b>43</b>
<b>4.4</b>	<b>Terças</b>	<b>43</b>
<b>4.5</b>	<b>Tirantes em Y</b>	<b>44</b>
<b>4.6</b>	<b>Tirantes em X</b>	<b>45</b>
<b>4.7</b>	<b>Travamento do banzo inferior das treliças</b>	<b>46</b>
<b>4.8</b>	<b>Propriedades</b>	<b>47</b>
<b>5</b>	<b>ESFORÇOS SOLICITANTES</b>	<b>49</b>
<b>5.1</b>	<b>Efeitos de vento</b>	<b>49</b>
<b>5.2</b>	<b>Viga/Treliça</b>	<b>51</b>

5.3	Telhas . . . . .	52
5.4	Terças . . . . .	53
5.5	Tirantes em Y . . . . .	53
5.6	Tirantes em X . . . . .	53
5.7	Análise estrutural . . . . .	54
6	MODELOS DE COBERTURA . . . . .	57
6.1	Modelo 1 . . . . .	57
6.2	Modelo 2 . . . . .	62
6.3	Modelo 3 . . . . .	64
7	RESULTADOS . . . . .	69
7.1	Modelo 1 . . . . .	69
7.2	Modelo 2 . . . . .	72
7.3	Modelo 3 . . . . .	73
7.4	Análise comparativa entre modelos . . . . .	76
7.5	Estudos adicionais . . . . .	81
7.5.1	Massa da cobertura como função objetivo e influência no custo da cobertura	81
7.5.2	Influência do espaçamento entre pórticos como variável de projeto . . . . .	81
8	CONCLUSÃO . . . . .	85
Conclusão	. . . . .	85
9	TRABALHOS FUTUROS . . . . .	87
	REFERÊNCIAS . . . . .	89
	APÊNDICES . . . . .	95
	APÊNDICE A – CONSIDERAÇÕES NORMATIVAS PARA O DIMENSIONAMENTO DE VIGAS DE ALMA CHEIA, TRELIÇAS E TIRANTES . . . . .	97
A.1	Vigas de alma cheia . . . . .	97
A.1.1	Força axial de compressão resistente de cálculo – $N_{c,Rd}$ . . . . .	97
A.1.1.1	Fator de redução $Q$ . . . . .	97
A.1.1.1.1	Elemento AA . . . . .	98
A.1.1.1.2	Elemento AL . . . . .	99
A.1.1.2	Fator de redução $\chi$ . . . . .	99
A.1.1.3	Força axial de flambagem elástica - $N_e$ . . . . .	100

A.1.2	Momento fletor resistente de cálculo - $M_{Rd}$	101
A.1.2.1	Vigas de alma não-esbelta	101
A.1.2.1.1	Flambagem lateral com torção - FLT	102
A.1.2.1.2	Flambagem local da mesa comprimida - FLM	103
A.1.2.1.3	Flambagem local da alma - FLA	103
A.1.2.2	Vigas de alma esbelta	104
A.1.2.2.1	Flambagem lateral com torção - FLT	104
A.1.2.2.2	Flambagem local da mesa comprimida - FLM	105
A.1.3	Força cortante resistente de cálculo - $V_{Rd}$	105
A.1.4	Combinação de força axial e momento fletor	106
<b>A.2</b>	<b>Treliças</b>	<b>107</b>
A.2.1	Força axial de compressão resistente de cálculo - $N_{c,Rd}$	107
A.2.1.1	Fator de redução $Q$	107
A.2.1.1.1	Perfil cantoneira simples	108
A.2.1.1.2	Perfil cantoneira dupla	108
A.2.1.2	Fator de redução $\chi$	109
A.2.1.3	Força axial de flambagem elástica - $N_e$	109
A.2.2	Força axial de tração resistente de cálculo - $N_{t,Rd}$	109
<b>A.3</b>	<b>Tirantes</b>	<b>110</b>
	<b>APÊNDICE B – PROPRIEDADES DOS PERFIS ADOTADOS</b>	<b>113</b>
<b>B.1</b>	<b>Cantoneiras de Abas Iguais</b>	<b>113</b>
<b>B.2</b>	<b>Perfil Laminado Tipo I</b>	<b>113</b>
<b>B.3</b>	<b>Perfis U de Chapas Dobradas</b>	<b>113</b>
<b>B.4</b>	<b>Barras Redondas Trefiladas</b>	<b>117</b>
<b>B.5</b>	<b>Telhas Trapezoidal 40</b>	<b>118</b>
	<b>APÊNDICE C – RESULTADOS DOS MODELOS OTIMIZADOS</b>	<b>121</b>
<b>C.1</b>	<b>Modelo 1</b>	<b>121</b>
<b>C.2</b>	<b>Modelo 2</b>	<b>124</b>
<b>C.3</b>	<b>Modelo 3</b>	<b>127</b>
	<b>APÊNDICE D – EXEMPLO DE UM GALPÃO OTIMIZADO</b>	<b>131</b>



# 1 Introdução

## 1.1 Generalidades

A utilização do aço como elemento estrutural no Brasil ainda é pequena nos diversos segmentos da construção, com exceção da área industrial, onde já existe uma participação expressiva das estruturas metálicas, principalmente na fabricação de edifícios industriais (GERDAU, 2005). O aço, se comparado à madeira ou concreto, possibilita a construção de estruturas mais esbeltas devido às suas características mecânicas. Geralmente são construídos com apenas um pavimento, resultando em estruturas mais leves e com fundações menos robustas. No entanto, a rigidez individual de cada peça é bem mais reduzida que a de peças equivalentes de concreto armado (CARNASCIALI, 1978) e, por isso, as cargas decorrentes do vento terão efeito significativo no dimensionamento dos elementos da cobertura.

A concepção estrutural pode levar em consideração diversos métodos e formas de modelagem. Os edifícios industriais costumam ser constituídos de sistemas estruturais compostos por pórticos regularmente espaçados, com o telhado apoiado em terças dispostas no sentido longitudinal, que por sua vez se apoiam em vigas ou treliças dispostas no sentido transversal (BELLEI, 2004). Isso possibilita a construção de grandes áreas cobertas, podendo ser utilizadas como áreas industriais, agrícolas e comerciais, como para lojas, estacionamentos e centros de distribuição (CBCA, 2010). Dentre os modelos mais utilizados na estrutura de sustentação do telhado de edifícios industriais estão os pórticos de alma cheia ou pórticos treliçados. O emprego de cada modelo depende de diversos fatores, como perfis estruturais disponíveis, disponibilidade de mão-de-obra e custo dos elementos. Além disso, cada modelo pode ser melhor adequado para determinado tamanho do vão do edifício industrial.

Por serem leves e esbeltas, um dos carregamentos mais importantes a ser considerado em estruturas metálicas é a ação do vento, principalmente se não houver as ações de pontes rolantes (BELLEI, 2004). Nesses casos, os esforços de sucção gerados pelo vento possuem efeitos significativos e a negligência desses carregamentos pode colocar as estruturas sob risco de colapso (BELLEI, 2004).

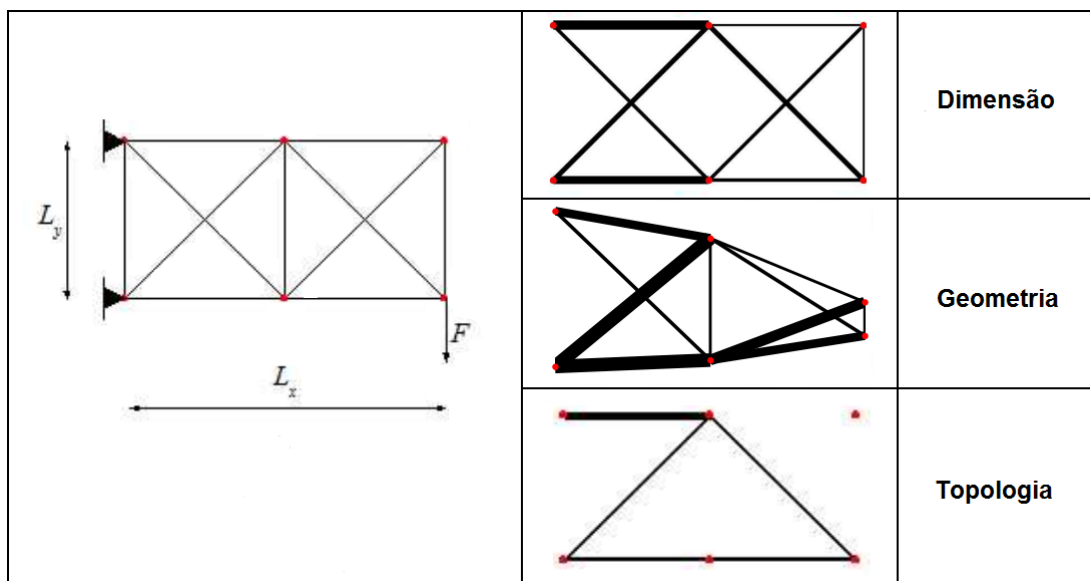
Nas últimas décadas, cada vez mais estudos têm sido feitos com o objetivo de reduzir os custos na área de engenharia civil (VAINIO; NIPPALA, 2013). Por isso, diversas técnicas têm sido utilizadas com o objetivo de manter a eficiência das estruturas sem negligenciar as exigências de concepção das mesmas, dentre elas, as técnicas de otimização de estruturas.

Segundo [Arora \(2012\)](#), a otimização estrutural pode ser definida como um conjunto de ferramentas matemáticas iterativas que ajudam no dimensionamento da estrutura. Estas são utilizadas de forma a buscar a estrutura com o melhor comportamento possível e que satisfaça as condições de esforços e restrições fornecidas.

Muitos problemas de engenharia têm diversas soluções possíveis e selecionar a que se adeque melhor pode ser uma tarefa complicada ([SONMEZ, 2011](#)). Isto acontece pois os problemas do mundo real de projeto de engenharia são modelados com base em diversas variáveis e possuem uma grande quantidade de configurações e considerações que podem ser adotadas. Com base nisto, podem ser classificados e formulados como problemas de otimização multiobjetivo. Esse termo, segundo ([KELESOGLU, 2007](#)), pode ser aplicado em todas as áreas de engenharia, mas foi originalmente utilizado para a otimização de estruturas de engenharia civil.

Pode-se otimizar as estruturas, como visto em [Rajan \(1995\)](#) e ilustrado na [Figura 1](#), nos seguintes fatores:

Figura 1 – Tipos de otimização estrutural.



Fonte: Adaptado ([TORII; LOPEZ; BIONDINI; LOPEZ et al., 2012, 2014](#) apud [FLÔR, 2015](#)).

(i) Otimização dimensional, cuja modificação é feita nas dimensões das seções transversais dos elementos que integram a estrutura;

(ii) Otimização geométrica, quando a forma das estruturas é variável, ou seja, as posições das coordenadas dos nós podem ser modificadas. Contudo, não há a retirada de nós ou elementos, apenas pode-se gerar um traçado melhorado;

(iii) Otimização topológica, pode ser realizada de duas formas: utilizando para

o caso de estruturas treliçadas o *Ground Structure*, cujos elementos e nós tidos como desnecessários à estrutura são retirados, ou definir alguns modelos preestabelecidos de topologia e realizar a otimização através de testes entre esses modelos;

Embora as três otimizações possam ser realizadas separadamente, a forma mais eficiente de projetar a otimização de estruturas treliçadas é considerar todos os três métodos de otimização simultaneamente (DEB; GULATI, 2016; DOMINGUEZ; STIHARU; SEDAGHATI, 2006).

Segundo Arora (2012), todo modelo estrutural que passa por um processo de otimização matemático possui: uma ou mais função objetivo, as variáveis de projeto e as restrições de projeto.

No caso de otimização estrutural, a função objetivo é uma função matemática que define, através das variáveis de projeto e das características da estrutura, a propriedade que será minimizada e avalia o desempenho das variáveis na busca do objetivo imposto (GENERT; YUILLE, 1988). Pode-se considerar como função objetivo a massa da estrutura, o custo final da construção, o volume de material, o tempo de construção e a eficiência de operação para o proprietário (GRIERSON; PAK, 1993; SALMON; JOHNSON; MALHAS, 2004; TANG; TONG; GU, 2005; QIAO; ZHOU, 2016). Em problemas de engenharia, é comum associar o custo à massa da estrutura. No entanto, apesar da massa da estrutura constituir uma parte significativa do custo, a orientação com menor peso não resulta necessariamente na estrutura com o menor custo (ADELI; SARMA, 2009).

O dimensionamento das estruturas pode possuir diversas soluções que respeitem as condições impostas. Entretanto, sempre se busca a solução que resultará no melhor custo benefício possível e, no processo de otimização, o melhor resultado trata-se da melhor combinação de variáveis. No geral, costuma-se adotar como variáveis as dimensões das seções transversais das barras, as coordenadas nodais ou a conexão entre os elementos (GRIERSON; PAK, 1993). Contudo, para estruturas de coberturas, deve-se dedicar particular atenção ao espaçamento entre pórticos visto que influencia diretamente as demais variáveis, como visto em Žula, Kravanja e Kravanja (2008), Kravanja e Žula (2010), Kravanja et al. (2013) e Kumar (2013). O dimensionamento dos elementos que compõem a cobertura e boa parte das verificações normativas são em função desta característica.

As restrições de projeto são as condições impostas que limitam o comportamento da estrutura e variam conforme os diferentes tipos de estruturas e são balizadas por critérios mecânicos, tecnológicos, econômicos e normativos (GRIERSON; PAK, 1993).

Rajeev e Krishnamoorthy (1992), Salajegheh e Vanderplaats (1993), Wu e Chow (1995), Galante (1996), Dominguez, Stiharu e Sedaghati (2006) e Saka (2003) utilizam variáveis de projeto discretas por avaliar problemas práticos de engenharia, dado que as seções de perfis a serem utilizadas são de acordo com as disponíveis no mercado. Por outro

lado, as coordenadas nodais podem ser contínuas, mas costuma-se restringi-las a certos intervalos de valores. Estas considerações são devidas ao fato de se procurar por uma estrutura exequível, não apenas matematicamente viável. Ainda, muitos projetos podem ter variáveis mistas, ou seja, discretas e contínuas na mesma formulação.

Os algoritmos usados para a solução de um problema de otimização podem ser, basicamente, determinísticos ou probabilísticos. Problemas de engenharia geralmente são não-lineares, não-convexos e multimodais (com muitos mínimos locais) (TORII; LOPEZ; BIONDINI, 2012; MIGUEL; LOPEZ; MIGUEL, 2013). Em consequência, vários algoritmos heurísticos têm sido utilizados no processo de otimização, dentre eles os algoritmos genéticos (GA), que são indicados para otimização de problemas complexos. A aplicação de algoritmos genéticos vem ganhando destaque devido a sua capacidade em localizar os valores ótimos globais (IYENGAR; S.K, 1980).

Os algoritmos genéticos são mecanismos de busca e, para tanto, utilizam métodos probabilísticos (WU; CHOW, 1995). Foram inspirados nos processos da genética orgânica e na seleção natural darwiniana (RAJEEV; KRISHNAMOORTHY, 1992), principalmente no que diz respeito às mutações, à variabilidade e à escolha dos mais aptos. Goldberg (1989) afirma que os algoritmos genéticos possuem diversas vantagens, dentre elas, pode-se destacar o fato de possuírem uma busca aleatória; pesquisam a partir de uma população de pontos em vez de por um único ponto de melhoria, assim, aumentando assim o espaço de busca, evitando estagnação em algum mínimo local; usam informações da função objetivo sem necessitar de qualquer informação de gradiente, ou seja, não necessitam da presença de versores que indiquem os pontos de máximo. Pereira (2007) afirma que, em comparação com os outros métodos, os algoritmos genéticos podem ser implementados para otimização de problemas com número de parâmetros elevados e são eficientes em relação custo computacional e em qualidade das respostas obtidas. No entanto, o ajuste dos dados iniciais é mais difícil de ser feito para um grande número de variáveis de projeto devido à quantidade de possibilidades permitidas. Este método é largamente utilizado nas mais diversas áreas de otimização, comprovando sua eficiência e robustez em diversos tipos de problemas, o que pode ser comprovado em Castro (2001), Yang e Soh (2002) e Saka (2003).

Como método de otimização, foi proposto o uso de do algoritmo genético *Search Group Algorithm (SGA)*, desenvolvido por Gonçalves, Lopez e Miguel (2015), que demonstrou bom desempenho quando aplicado em problemas clássicos da literatura.



## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivos Gerais

Dimensionar e otimizar estruturas em aço utilizadas na cobertura de edifícios industriais, a fim de diminuir seu custo, obedecendo os critérios das normas [ABNT NBR 6123 \(1988\)](#) – Forças devidas ao vento em edificações e [ABNT NBR 8800 \(2008\)](#) – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

(i) Otimizar dimensionalmente, geometricamente e topologicamente os elementos da cobertura de um edifício industrial para três modelos sugeridos, modificando as dimensões das seções transversais das barras dos elementos, posição dos nós e formato da estrutura de sustentação;

(ii) Executar os itens (ii) e (iii) para diversos vãos transversais de um edifício industrial (largura do galpão);

(iii) Determinar o espaçamento longitudinal entre pórticos, o número de terças e o número de travamentos ideal para um edifício industrial de acordo com a largura do mesmo;

(iv) Comparar os custos totais da cobertura entre os modelos otimizados, para cada vão;

(v) Comparar as massas de aço e custos para três modelos quando a função objetivo é a massa e quando a função objetivo é o custo da cobertura de um edifício industrial;

(vi) Determinar a influência da consideração do espaçamento entre pórticos como variável de projeto na determinação do custo da cobertura de um edifício industrial.

## 1.3 Método

Inicialmente, analisou-se alguns modelos de sustentação comumente utilizados na cobertura de edifícios industriais. Simultaneamente, iniciaram-se os estudos sobre otimização de estruturas e sobre o algoritmo genético SGA.

Desenvolveu-se um algoritmo no Matlab<sup>®</sup> para a realização das verificações de Estado Limite Último e Estado Limite de Serviço necessárias na estrutura de um edifício industrial para três modelos habitualmente executados e consagrados na literatura. Cada modelo foi desenvolvido de maneira isolada devido às particularidades e restrições no dimensionamento dos elementos. O algoritmo desenvolvido, originalmente, não realizava a otimização da estrutura, mas foi utilizado com o objetivo de ser validado após a

determinação dos esforços com o *software* MASTAN2. Utilizou-se as normas [ABNT NBR 6123 \(1988\)](#) – Forças devidas ao vento em edificações e [ABNT NBR 8800 \(2008\)](#) – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios.

A seguir, o custo global da cobertura (função objetivo) foi otimizado através da implementação do algoritmo genético *SGA* nos algoritmos desenvolvidos. O custo global da cobertura foi relacionado a variáveis de projeto, como a seção transversal dos elementos da cobertura, espessura das telhas, inclinação do telhado, número de terças e elementos de contraventamento, espaçamento longitudinal entre pórticos, bem como do modelo topológico utilizado.

Por fim, após serem gerados os resultados preliminares da função objetivo e os valores ótimos das variáveis, o domínio de busca de cada variável foi ajustado para que o algoritmo não gerasse soluções muito distantes dos valores ótimos.

Optou-se por realizar a otimização dimensional, geométrica e topológica em conjunto para os três modelos analisados, de modo a obter o melhor resultado.

## 1.4 Organização do Trabalho

**Capítulo 2 – *Revisão de Literatura*:** é separado em duas partes. A primeira faz algumas considerações sobre as estruturas de aço utilizadas em edifícios industriais enquanto a segunda apresenta alguns estudos na otimização de edifícios industriais.

**Capítulo 3 – *Processo de otimização*:** É descrito o funcionamento do método de otimização empregado.

**Capítulo 4 – *Concepção estrutural e Dimensionamento*:** Trata das soluções encontradas quanto aos componentes estruturais do edifício industrial e descreve o dimensionamento dos mesmos de acordo com a [ABNT NBR 8800 \(2008\)](#).

**Capítulo 5 – *Casos de Carregamento*:** Aborda os casos de carregamento utilizados para cada elemento.

**Capítulo 6 – *Modelos de Cobertura*:** Expõe a otimização de três modelos de cobertura para um edifício industrial, apresentando as particularidades de cada modelo.

**Capítulo 7 – *Resultados*:** São apresentados os resultados para os três modelos estudados em diversos vãos. Adicionalmente, são feitos dois estudos: a consideração da massa da cobertura como função objetivo e a influência do espaçamento entre pórticos no custo global.

**Capítulo 8 – *Conclusão*:** Realiza-se as conclusões acerca do apresentado no trabalho.

**Capítulo 9 – *Trabalhos Futuros*:** Elenca-se os possíveis trabalhos futuros.

## 2 Revisão de Literatura

### 2.1 Estruturas em aço

De acordo com [Pinheiro \(2005\)](#), dentre as vantagens do aço estrutural, pode-se citar: possibilidade de execução de obras rápidas e limpas; alta resistência estrutural, possibilitando a execução de estruturas leves para vencer grandes vãos; garantia das dimensões e propriedades do material, proporcionando alto controle de qualidade; e resistência contra vibrações e choques.

Segundo [Pfeil e Pfeil \(2009\)](#), perfis estruturais em aço podem ser fabricados de diversas formas e os principais são os perfis laminados, perfis soldados e perfis de chapa dobrada. [CBCA \(2003\)](#) afirma que, para alguns elementos, o uso de perfis de chapa dobrada pode resultar em uma estrutura mais econômica.

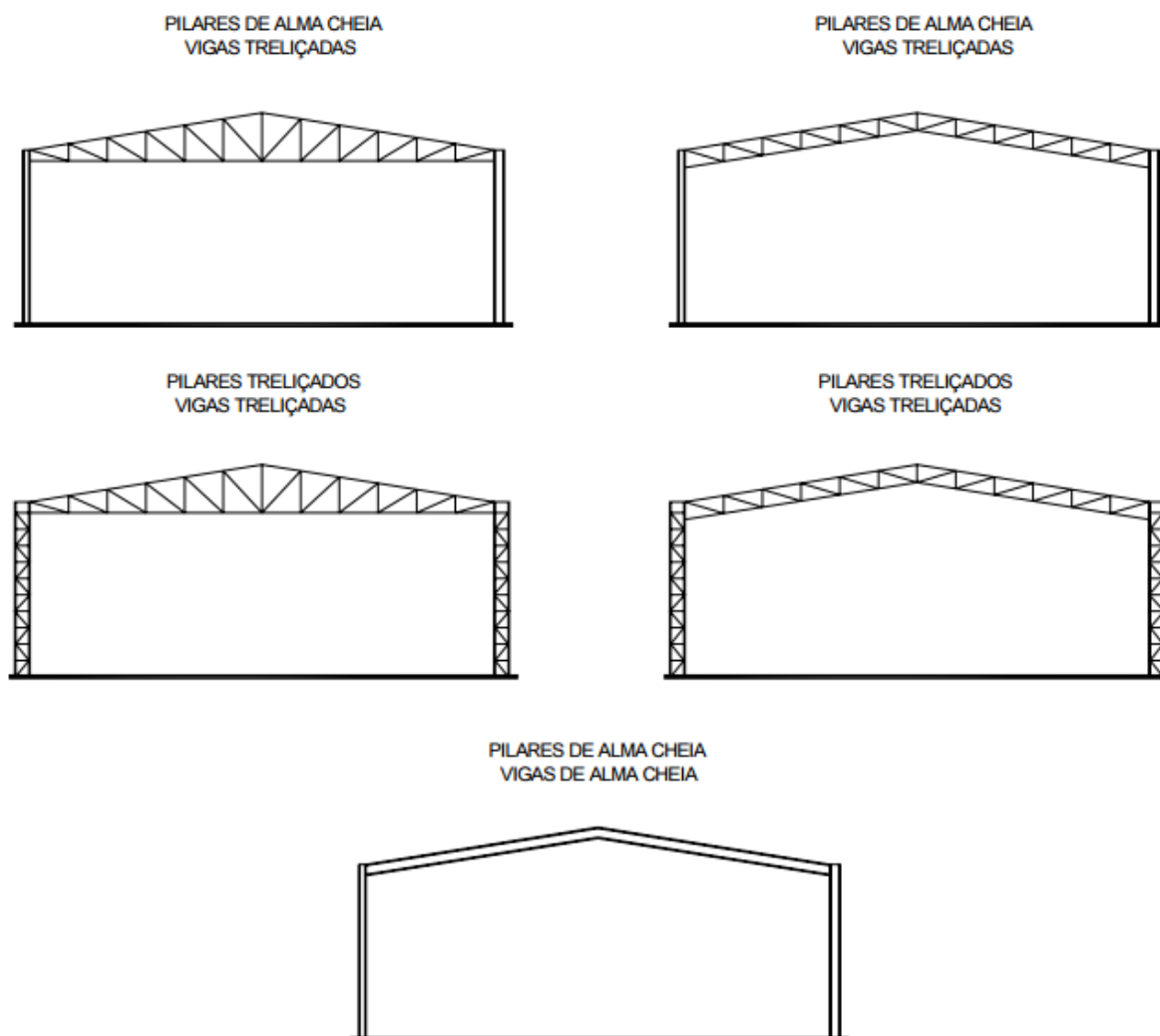
Uma das grandes aplicações das estruturas metálicas se dá no campo das coberturas de grande vão, especialmente as de caráter industrial ([CARNASCIALI, 1978](#)). [Pfeil e Pfeil \(2009\)](#) afirma que as treliças utilizadas em coberturas, têm em geral, banzo superior inclinado, enquanto aquelas com banzos paralelos são comumente usadas em apoios de pisos e pontes.

As estruturas que formam os pórticos de edifícios industriais podem ser moldadas por perfis de alma cheia ou treliçados. Pode-se ter uma estrutura cujos pilares sejam constituídos por perfis de alma cheia, enquanto que a cobertura pode ser formada por treliças transversais; a mesma estrutura poderá ter, além das treliças de cobertura, os pilares em forma de treliças; ou ainda, uma estrutura de pilares e vigas de cobertura em perfis de alma cheia formando um pórtico ou mesmo pilares e vigas de cobertura em treliças, também formando um pórtico em seu conjunto ([NETO, 2007](#)), conforme pode ser visto na [Figura 2](#).

Por serem sujeitos às ações de vento, os edifícios industriais possuem sistemas de contraventamentos, definidos como barras colocadas nas estruturas com a finalidade de garantir a estabilidade do conjunto durante sua vida útil e durante a fase de montagem, e para dar ao edifício uma rigidez espacial ([BELLEI, 2004](#)). Segundo o autor, deve-se distinguir os contraventamentos horizontais que se encontram no plano da cobertura e os das cordas inferiores das tesouras ou vigas do pórtico e geralmente estão sujeitos aos esforços de tração ou compressão.

Além dos diferentes tipos de estruturas, os galpões podem ser classificados em vãos simples, múltiplos ou geminados ([Figura 3](#)), do tipo Shed ([Figura 4](#)) e com cobertura em arco ([Figura 5](#)).

Figura 2 – Tipos básicos de galpões.



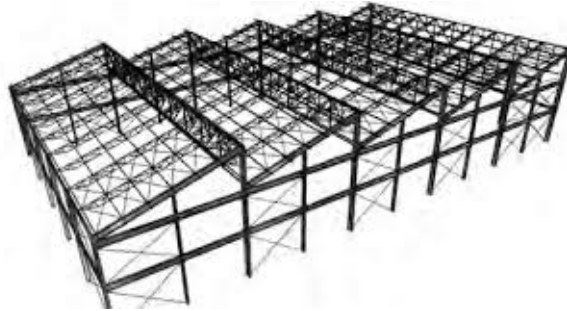
Fonte: Adaptado ([NETO, 2007](#)).

Figura 3 – Galpão geminado com duas meias-águas.



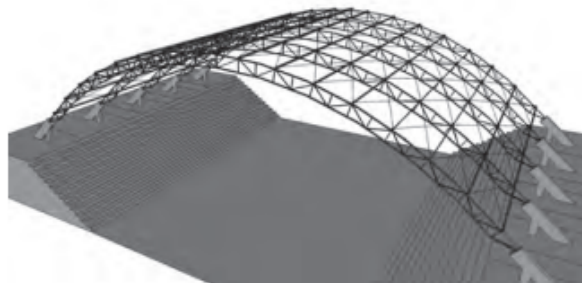
Fonte: ([CBCA, 2010](#)).

Figura 4 – Galpão em Shed com pórticos em perfis I, vigas mestras e secundárias em treliças.



Fonte: (CBCA, 2010).

Figura 5 – Galpão em arco.



Fonte: (CBCA, 2010).

Smith (1996) e Salmon, Johnson e Malhas (2004) afirmam que a elaboração e otimização do projeto estrutural é um processo iterativo que envolve as seguintes etapas:

1. Definição do *layout* geral da estrutura de modo que satisfaça as necessidades do usuário e elaboração de critérios para avaliar;
2. Elaboração de estudos preliminares de custo para diversos modelos estruturais. Essa análise pode ser aplicada para diferentes materiais;
3. Elaboração de projetos e análises preliminares para uma ou mais alternativas de projeto estudadas no item 2;
4. Detalhamento do projeto final, que envolve:
  - a) Escolha do modelo de projeto a ser utilizado nas análises;
  - b) Determinação dos carregamentos;
  - c) Análise estrutural assumindo dimensões da seção transversal dos elementos que foram obtidos na análise preliminar;
  - d) Uso dos resultados da análise estrutural para verificar se os elementos de teste satisfazem as restrições de projeto;

- e) Alteração das dimensões dos elementos e repetição dos itens (c) e (d) até chegar em um modelo otimizado;
- 5. Confirmação se os perfis utilizados estão disponíveis no mercado;
- 6. Inspeção da execução da estrutura a fim de verificar se o projeto está sendo rigorosamente seguido;

## 2.2 Otimização de estruturas

Os primeiros passos da otimização de estruturas consistiam de modelos analíticos para a solução e eram aplicados a um número limitado de problemas. As primeiras tentativas da otimização de estruturas foram feitas por [Maxwell \(1869\)](#) e por [Michell \(1904\)](#) com uso de equações diferenciais. O progresso recente da otimização estrutural coincidiu com o surgimento dos computadores digitais, que trouxe consigo técnicas emergentes para solução das complexas equações que regem os fenômenos da engenharia estrutural ([COUTINHO, 2006](#)).

O objetivo da otimização estrutural consiste na busca dos melhores valores de certas variáveis que levem a projetos ótimos, ao mesmo tempo que todas as restrições impostas sejam satisfeitas ([CHENG, 1992](#)). Vários autores propõem soluções para otimização geométrica, dimensional e topológica. No entanto, a maioria trata apenas da otimização de treliças usadas para as mais diversas finalidades e são poucos os autores que abordam a otimização de edifícios industriais a partir da escolha do número de terças, distância entre pórticos, comparação entre pórticos formados por vigas de alma cheia ou treliças e variação do vão transversal da edificação. A seguir serão abordados alguns exemplos de otimização encontrados na literatura com aplicação exclusiva em edifícios industriais.

Iniciando pela otimização de edifícios industriais formados por pórticos de alma cheia, [Lee e Knapton \(1974\)](#) fazem uma investigação do custo mínimo de estruturas de edifícios industriais compostos por pórticos em aço. As variáveis de projeto utilizadas são: número de colunas por pórtico, espaçamento entre pórticos, inclinação do telhado, altura dos beirais, e largura e comprimento do edifício.

[Saka \(2003\)](#) aplica um algoritmo genético para otimização das seções transversais de vigas e colunas que compõem telhados inclinados. Além disso, determina a profundidade e comprimento das mãos-francesas instaladas no beiral, na junção entre vigas e colunas de perfil I, de modo a gerar a estrutura mais econômica.

[Žula, Kravanja e Kravanja \(2008\)](#) e [Kravanja et al. \(2013\)](#) realizam a otimização da massa de um edifício industrial em aço através do método de programação não-linear *MINLP*. A estrutura consiste em pórticos que são ligados por terças e todos os elementos são formados por perfis I laminados. A otimização dimensional e topológica é aplicada a

partir do uso de variáveis discretas. Também, [Kravanja e Žula \(2010\)](#) utilizou o *MINLP* para gerar a estrutura com menor custo a partir da otimização dimensional e topológica de um galpão industrial formado por pórticos com vigas de alma cheia.

[Kumar \(2013\)](#) apresenta a otimização dimensional, topológica e do custo de material e mão de obra de estruturas em aço de um edifício industrial através do uso de algoritmos genéticos. O edifício industrial é formado por pilares e vigas de alma cheia e a otimização topológica trata da definição do melhor número de pórticos e de terças da cobertura.

Em relação ao uso de treliças em edifícios industriais, [Russell e Choudhary \(1980\)](#) apresentam a otimização com minimização do custo de um edifício industrial composto por treliças de cobertura na direção transversal, contraventamentos longitudinais e fundações sob as colunas. O problema é decomposto em três subproblemas: definição do número de divisões das treliças, número de pórticos na direção longitudinal e taxa de proporção entre profundidade e extensão das treliças. A função objetivo inclui custos de material, mão de obra, equipamentos, despesas gerais e lucro. Nesse processo, o número de travamentos do banzo inferir da treliça também é otimizado.

[Jendo e Paczkowski \(1993\)](#) utilizam a otimização do custo de um edifício industrial composto por treliças espaciais com perfil tubular sujeitas a restrições de deslocamentos, tensões e flambagem. É feita a otimização das telhas, terças, treliças, colunas e elementos de vedação verticais.

[Tiainen et al. \(2012\)](#) demonstra o uso de técnicas de metamodelos na otimização do custo de um edifício industrial constituído de treliças com perfis tubulares. As treliças foram otimizadas com diferentes vãos, alturas e larguras de carregamento antes da final otimização da estrutura para ficar em conformidade com as características da cobertura em que estará localizada. Os custos são calculados com base nos materiais utilizados e características de fabricação, que envolvem: preparação, corte, montagem, soldagem e pintura, entre outros. Foram utilizadas como variáveis de projeto as dimensões dos elementos dos banzos e travamentos e posição dos nós na treliça, sendo realizada otimização dimensional e geométrica.

[Flôr \(2015\)](#) efetua a otimização geométrica e dimensional de dois modelos de treliças utilizados em um edifício industrial a fim de gerar a estrutura com o menor peso. Além disso, realizou a otimização do peso total do edifício através da definição do melhor espaçamento entre pórtico. Os esforços de vento também eram atualizados de acordo com a inclinação do telhado. A largura do galpão, o número de terças e o número de travamentos dos dois modelos de treliça foram considerados constantes.

A respeito da otimização e comparação entre pórticos formados por perfis de alma cheia ou treliças, [Machado \(2007\)](#) faz um estudo para otimização das seções dos perfis e ligações utilizadas na estrutura metálica de um galpão com o objetivo de gerar o menor

custo global. São testadas várias tipologias para as vigas e pilares, com perfis "I", caixão e tipo treliçado. No entanto, não é utilizado nenhum algoritmo de otimização e os diferentes perfis são testados manualmente. O custo global da estrutura foi simplesmente associado ao seu peso e o melhor desempenho foi alcançado pelo sistema treliçado.

[Chaves \(2008\)](#) avaliou comparativamente o desempenho de sistemas estruturais de edifícios industriais formados por pórticos de alma cheia e pórticos treliçados. Diversos modelos foram testados manualmente para vários vãos, mas com espaçamento entre pórticos constante. O autor conclui que os pórticos de alma cheia apresentam taxas de consumo de aço maiores em relação às outras tipologias.



### 3 Processo de otimização

De modo geral, a otimização de estruturas não é levada em consideração ao realizar o dimensionamento das mesmas. Mais especificamente, são poucos os casos observados em que é abordada a otimização da cobertura de edifícios industriais através da escolha do melhor conjunto de variáveis.

Pode-se considerar o espaçamento entre pórticos sucessivos como uma das variáveis de maior impacto na otimização de coberturas. Neste trabalho, os pórticos irão se referir à estrutura formada por pilares e vigas/treliças da seção transversal do galpão. As cargas externas de vento e de sobrecarga que atuam em um telhado são divididas por regiões de influência para cada estrutura que o compõem (telhas, terças, tirantes, contraventamentos e pórticos). Assim, quanto maior é o espaçamento entre pórticos sucessivos, maior é a região de influência de cada elemento da cobertura, e por consequência, maior é a carga que recebem. E ainda, maiores são os seus comprimentos, aumentando a possibilidade de instabilidades. Por outro lado, quanto maior é o espaçamento entre pórticos sucessivos, menor será a quantidade de treliças ou vigas e, por conseguinte, menor será o custo relacionado a esses elementos. Além disso, a espessura das telhas depende da quantidade de terças da cobertura. Quanto menor for o número de terças e, consequentemente, maior for o espaçamento entre elas, maior deverá ser a espessura da telha. Assim, é necessária uma análise para verificar qual combinação entre espessura das telhas e número de terças é a ideal. Analogamente, quanto maior for o número de travamentos do banzo inferior de uma treliça, menos robusto deverá ser a treliça e menores serão os custos da mesma.

Um problema genérico de otimização pode ser descrito da seguinte maneira: encontrar um vetor  $x = x_1, x_2, \dots, x_n$ , que minimize a função objetivo  $f_{obj} = f(x)$ , estando esta sujeita às restrições  $g_i(x) \leq 0$ , com  $i = 1, \dots, n_{ri}$ , e  $h_j = 0$ , com  $j = 1, \dots, n_{rd}$ , sendo  $n_{ri}$  e  $n_{rd}$  o número de restrições de igualdade e de desigualdade, respectivamente, calculadas de acordo com as normas (ARORA, 2012). A formulação geral do problema abordado baseia-se em encontrar um conjunto de variáveis a serem utilizados no projeto, relativas aos perfis dos elementos das telhas, tirantes, terças, contraventamentos e vigas ou treliças. Ainda, esse conjunto engloba o espaçamento entre pórticos, número de terças, número de travamentos do banzo inferior das treliças, altura da cobertura, entre outros, de acordo com o modelo estudado. Devem atender as restrições normativas, apresentando a configuração viável com menor custo para o galpão. Busca-se a cobertura com o menor custo, sendo esta obtida por meio da soma dos custos de cada elemento multiplicando seu peso por seu respectivo custo unitário. O custo  $C$  é calculado da seguinte forma:

$$C = \gamma \left( \sum_{i=1}^n a_i l_i c_i \right) + P \quad (3.1)$$

sendo:

$\gamma$  o peso específico do aço, definido em [seção 4.8](#);

$a_i$  a área da seção transversal do perfil adotado para o elemento  $i$ ;

$l_i$  o comprimento do elemento  $i$ ;

$c_i$  o custo unitário de cada elemento  $i$  que compõe a cobertura;

$n$  o número total de elementos;

$P$  um acréscimo de peso (penalidade) devido às restrições do problema.

Aplicou-se os fatores de penalidade em todas as verificações normativas, cujo não cumprimento das mesmas acarreta em acréscimos de peso. No caso de as restrições serem atendidas, as penalidades correspondentes assumem valores nulos. Logo:

$$P = \beta \sum_{i=1}^{n_r} g_i \quad (3.2)$$

onde:

$\beta$  é o fator de penalidade, adotado da ordem de  $10^{10}$ ;

$g_i$  é a  $i$ -ésima restrição;

$n_r$  é o número total de restrições.

Aplicou-se valores elevados para  $\beta$ , de modo a excluir da busca as combinações de perfis que não fossem adequadas.

Os elementos constituintes da cobertura de um edifício industrial possuem custos unitários diferentes. Assim, uma estrutura com a menor massa possível, que respeite as limitações normativas, não é necessariamente a estrutura que possuirá o menor custo. Dessa forma, busca-se a otimização do projeto da cobertura para edifícios industriais que resulte no menor custo possível e respeite as limitações normativas. Os custos referentes ao transporte, manutenção, corte, montagem e ligações dos elementos, seja com parafusos ou soldas, não foram consideradas. Nesse sentido, realizou-se a otimização dimensional, geométrica e topológica de três modelos de cobertura usando o algoritmo SGA. Adicionalmente, em [7.5.1](#) foi feito um estudo comparativo quando se considera o custo como função objetivo e quando se considera a massa como função objetivo.

### 3.1 Apresentação do Algoritmo Otimizador SGA

O *Search Group Algorithm* (SGA), ou Algoritmo do Grupo de Busca, é um método meta-heurístico de otimização global desenvolvido para aplicação em estruturas treliçadas, mas com bom desempenho em problemas com variáveis de projeto discretas ou contínuas

em geral. Através do ajuste dos seus parâmetros de entrada, definição da função objetivo, restrições e variáveis de projeto, pode ter aplicabilidade em diversos problemas.

### 3.1.1 Funcionamento do SGA

A ideia principal do SGA é propor um equilíbrio entre a exploração do domínio das variáveis e o refinamento dos resultados. Nas primeiras iterações do processo de otimização, o SGA tenta achar regiões promissoras do domínio (fase global) e, conforme são executadas as iterações, o algoritmo aprimora o conjunto de variáveis em cada uma dessas regiões promissoras a fim de gerar o melhor resultado para a função objetivo (fase local).

O processo de otimização engloba 5 etapas, detalhadas a seguir:

1. População inicial;
2. Seleção do Grupo de Busca inicial;
3. Mutação do Grupo de Busca;
4. Geração das Famílias de cada membro do Grupo de Busca;
5. Seleção do novo Grupo de Busca.

### 3.1.2 População Inicial

Na primeira etapa, a população inicial é gerada aleatoriamente no domínio de busca de cada variável:

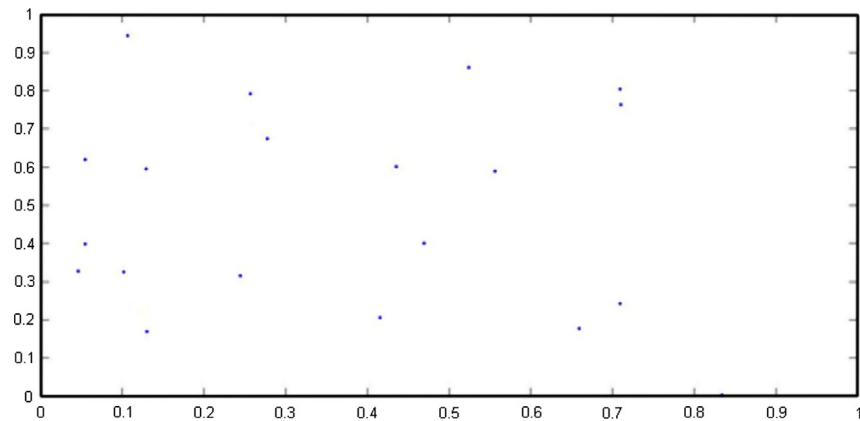
$$P_{ij} = x_j^{\min} + (x_j^{\max} - x_j^{\min})U[0, 1], \text{ para } j = 1 \text{ até } n, i = 1 \text{ até } n_{pop}, \quad (3.3)$$

em que  $P_{ij}$  é a  $j$ -ésima variável de projeto do  $i$ -ésimo indivíduo da população  $P$ ,  $[0, 1]$  é uma variável uniforme aleatória que varia de 0 a 1,  $x_j^{\min}$  e  $x_j^{\max}$  são os limites inferior e superior do domínio da  $j$ -ésima variável do projeto, respectivamente,  $n$  é o número de variáveis do projeto e  $n_{pop}$  é o tamanho da população. A [Figura 6](#) ilustra uma população gerada aleatoriamente em um domínio bidimensional (duas variáveis de projeto), ambos com limite inferior e superior igual a 0 e 1, respectivamente.

### 3.1.3 Seleção do Grupo de Busca inicial

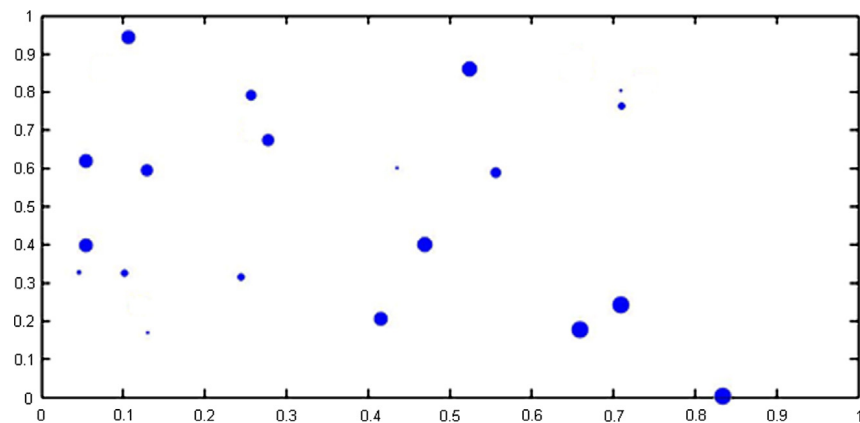
Depois que a população inicial é gerada, a função objetivo de cada indivíduo é avaliada. A [Figura 7](#) ilustra esse passo ao aplicar maiores círculos para os indivíduos com as melhores funções objetivos. Após a avaliação da função objetivo de cada indivíduo, o Grupo de Busca é formado ao selecionar  $n_g$  indivíduos da população inicial  $P$  ([Figura 8](#)).

Figura 6 – População inicial gerada aleatoriamente em um domínio bidimensional.



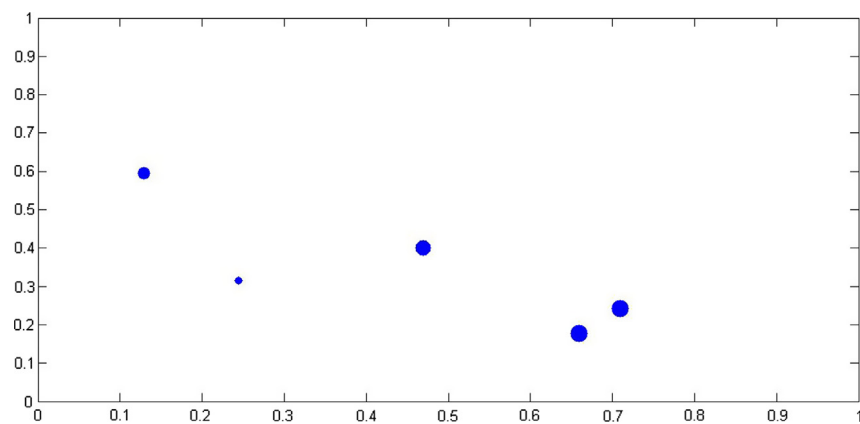
Fonte: (GONÇALVES; LOPEZ; MIGUEL, 2015).

Figura 7 – População inicial: quanto mais for o círculo, melhor é a função objetivo do indivíduo.



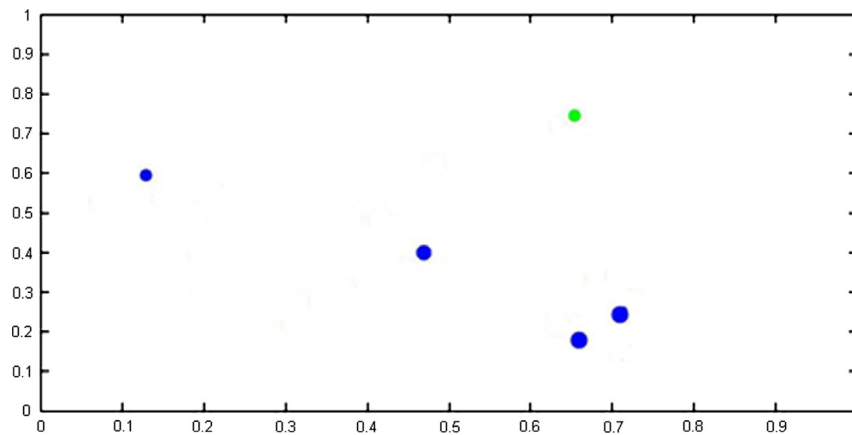
Fonte: (GONÇALVES; LOPEZ; MIGUEL, 2015).

Figura 8 – Grupo de Busca inicial composto por cinco membros da população inicial.



Fonte: (GONÇALVES; LOPEZ; MIGUEL, 2015).

Figura 9 – Mutação do Grupo de Busca.



Fonte: (GONÇALVES; LOPEZ; MIGUEL, 2015).

### 3.1.4 Mutação do Grupo de Busca

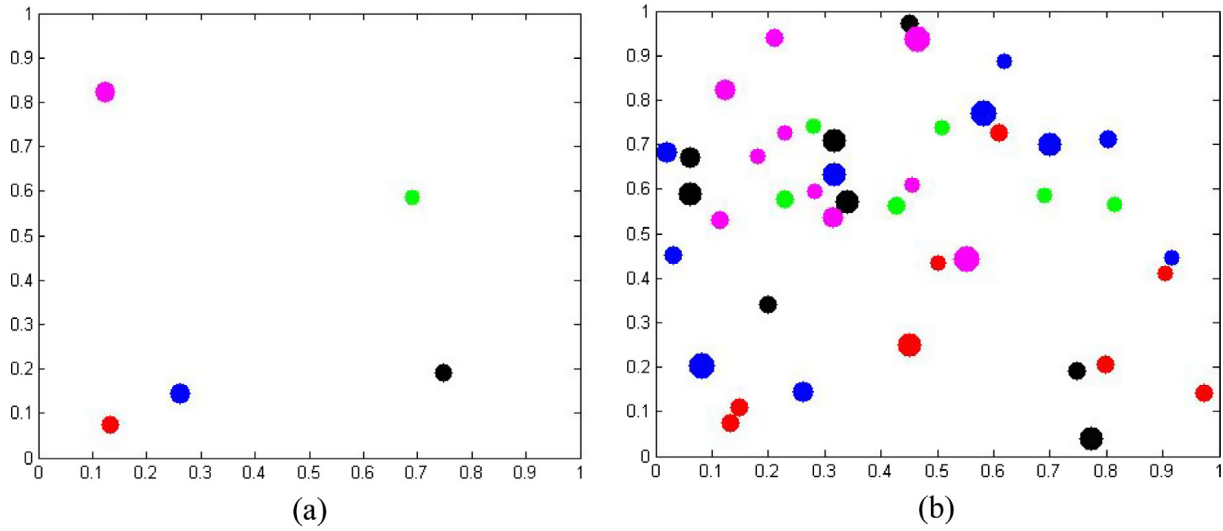
A fim de melhorar a habilidade de busca global, o grupo de busca sofre mutação a cada iteração. Essa estratégia consiste em substituir indivíduos do grupo de busca baseado nas estatísticas do Grupo de Busca atual. A ideia é incluir no Grupo de Busca indivíduos distantes da atual posição dos membros atuais, explorando novas regiões do domínio de cada variável. A probabilidade de um indivíduo ser substituído depende da qualidade do conjunto de variáveis que compõe o mesmo. Quanto pior for o conjunto de variáveis, pior será o indivíduo, e mais chances ele tem de ser substituído. A Figura 9 ilustra o grupo de busca da Figura 8 após o processo de mutação, onde um indivíduo mutado substituiu um indivíduo do grupo de busca.

### 3.1.5 Geração das Famílias

Uma família é definida como o conjunto composto por cada membro do grupo de busca e os indivíduos que ele gerou. Assim, uma vez que o grupo de busca está formado, cada um de seus membros gera uma família. A Figura 10 a) ilustra os indivíduos de um grupo de busca e Figura 10 b) o grupo de busca original mais indivíduos gerados por cada membro do dele, denominado família. Percebe-se que os novos indivíduos gerados estão espalhados no domínio de busca.

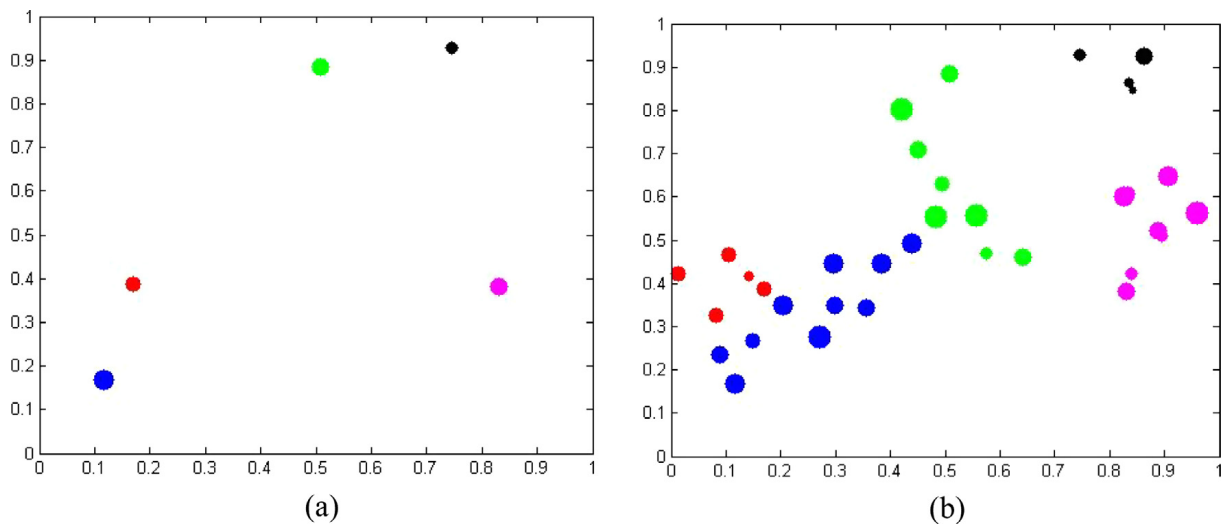
A geração de novas famílias está relacionada a um parâmetro  $\alpha$ , cujo valor é diminuído a cada iteração do processo de busca. Esse procedimento é ilustrado na Figura 11. A primeira imagem mostra, como exemplo, cinco membros do grupo de busca e a segunda as famílias geradas a partir desses membros. Pode-se perceber que os indivíduos gerados tendem a se localizar nas proximidades do indivíduo de origem conforme o valor do parâmetro  $\alpha$  diminui. No entanto, é importante definir um valor de  $\alpha$  de modo que permita explorar novas regiões do domínio de busca das variáveis onde a solução global da

Figura 10 – Grupo de busca (a) e Família (b) para as primeiras iterações do SGA



Fonte: (GONÇALVES; LOPEZ; MIGUEL, 2015).

Figura 11 – Grupo de busca (a) e Família (b) para as últimas iterações do SGA



Fonte: (GONÇALVES; LOPEZ; MIGUEL, 2015).

Equação 3.3 possa estar localizada. Um dos diferenciais do SGA é que quanto melhor for o indivíduo do grupo de busca, mais indivíduos ele gera, ou seja, o número de indivíduos que cada membro do grupo de busca gera depende de sua função objetivo. Por isso, deve-se atentar ao domínio de cada variável para que o algoritmo não busque regiões em que a solução global possa não estar localizada.

### 3.1.6 Seleção do novo Grupo de Busca

Como mencionado, o SGA é constituído por duas fases: global e local. Nas primeiras  $it_{global}^{max}$  iterações, ou fase global, o principal objetivo do algoritmo é explorar o domínio de busca. Assim, após a criação das famílias, é selecionado um novo grupo de busca, que será formado pelo melhor membro de cada família. Quando a iteração é maior do que  $it_{global}^{max}$  o esquema de seleção é modificado: o novo grupo de busca é formado pelos melhores  $n_g$  indivíduos entre todas as famílias. Essa fase é chamada local porque o algoritmo faz o refinamento do domínio de busca de cada variável para gerar o melhor conjunto de variáveis.

### 3.1.7 Parâmetros de entrada

Os parâmetros de entrada do SGA, juntamente com os seus propósitos no processo de otimização, estão listados a seguir:

(i)  $n_{pop}$ : Número de indivíduos na população. Este valor é mantido constante durante todo o processo de otimização. Utilizou-o com o valor 100 em todos os exemplos neste apresentado;

(ii)  $it^{max}$ : Número máximo de iterações. É empregado como critério de parada no processo de otimização e, juntamente com  $n_{pop}$ , define o tempo computacional. Utilizou-o com os valores de 20000, 25000, e 30000, conforme o modelo analisado;

(iii)  $it_{global}^{max}$ : Número máximo de iterações da fase global. Quanto mais próximo de um for o valor deste parâmetro, mais avaliações da função objetivo (custo global da estrutura) serão realizadas para encontrar regiões promissoras. Manteve-se constante com o valor de 0.3, ou seja, 30% do  $it^{max}$ ;

(iv)  $\alpha^k$ : Controla a distância que um novo indivíduo é gerado a partir do seu membro do grupo de busca. Este parâmetro é responsável pelas capacidades de exploração e aproveitamento do SGA. Seu valor diminui ao longo das iterações, refinando as soluções encontradas nas regiões promissoras. Utilizou-o com o valor dois para  $\alpha^0$  (valor inicial de  $\alpha^k$ );

(v)  $\alpha_{min}$ : Estabelece um valor mínimo para  $\alpha^k$ . Assegura uma mobilidade mínima para os novos indivíduos gerados mesmo nas últimas iterações do SGA. Utilizou-o com o valor 0.1;

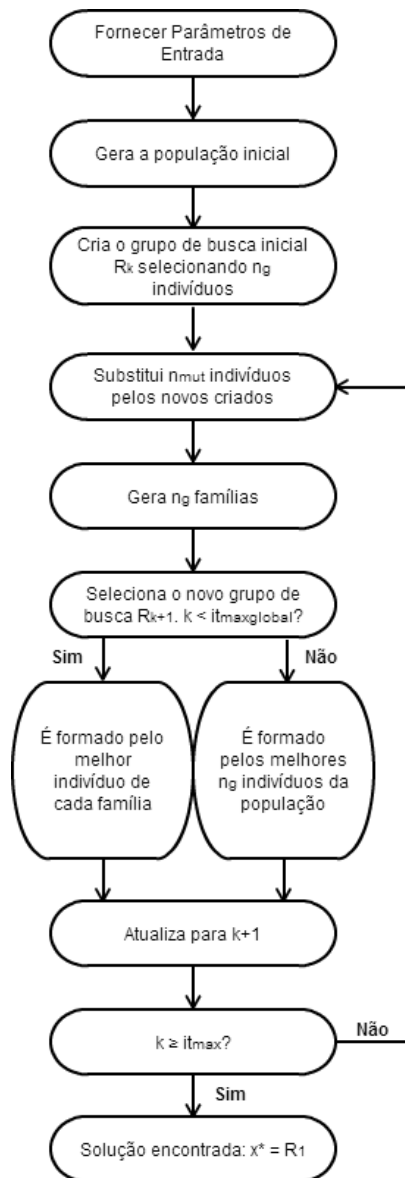
(vi)  $n_{mut}$ : Número de mutações em cada iteração. É responsável pela capacidade do algoritmo de explorar o domínio da função objetivo, evitando que o mesmo fique preso em mínimos locais. Manteve-se constante com o valor de 3% da população;

(vii)  $n_g$ : Número de membros do grupo de busca. Manteve-se constante com o valor de 20% da população.

### 3.1.8 Pseudo-código do SGA

Flôr (2015) elaborou um pseudo-código para o SGA, em forma de fluxograma (Figura 12).

Figura 12 – Pseudo-código do SGA.





## 4 Concepção estrutural e dimensionamento

Os edifícios industriais, ou simplesmente galpões, são normalmente construídos com elementos metálicos em sua totalidade, dos pilares de sustentação até as telhas. O sistema de sustentação da cobertura pode possuir diversos formatos e os mais utilizados são constituídos por vigas de alma cheia ou por treliças. Ambos os sistemas são formados por elementos similares, que tem a função de resistir aos esforços de vento, peso próprio de elementos adjacentes e até mesmo servir como sistema de vedação.

Foram dimensionados os elementos que constituem apenas a cobertura de um edifício industrial (telhas, tirantes, terças, sistemas de contraventamento e treliças/vigas), sem considerar os pilares e vigas longitudinais. A edificação possui 48 metros de comprimento e largura variável. A altura dos pilares é de 6 metros e será utilizada para calcular os esforços provenientes da ação do vento.

Neste trabalho foram analisados três modelos de sustentação, conforme mostrado na [Figura 13](#). O primeiro modelo é constituído por vigas com perfis I laminados, enquanto os os dois outros são estruturas treliçadas feitas com perfis cantoneira.

Os elementos utilizados para a concepção deste trabalho estão relacionados abaixo e o dimensionamento será detalhado posteriormente:

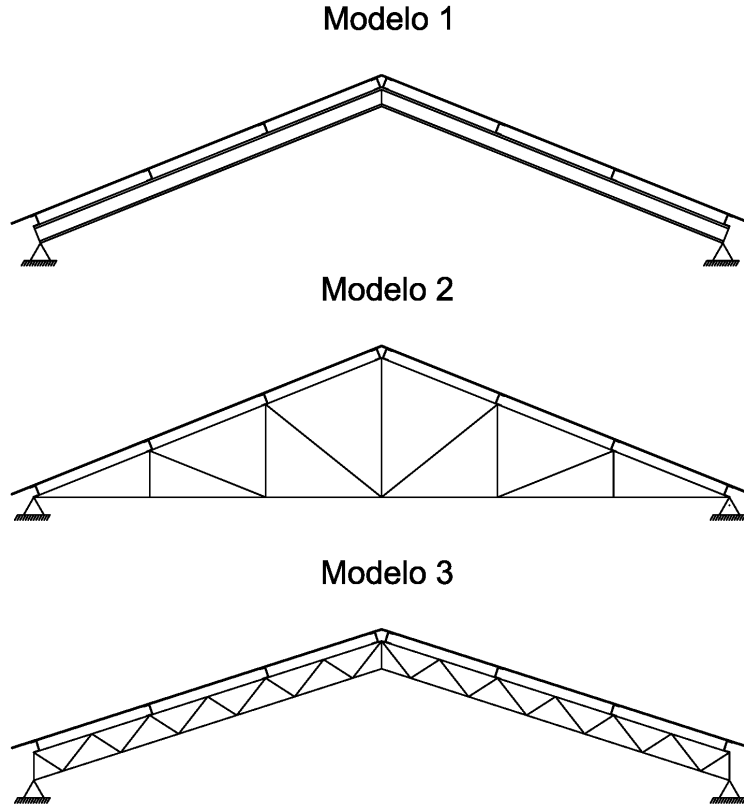
- Vigas/treliças;
- Telhas;
- Terças;
- Tirantes em Y;
- Tirantes em X;
- Travamento do banzo inferior das treliças (mão-francesa).

Os perfis utilizados em cada elemento, com características geométricas e custos, estão definidos no [Apêndice B](#). As propriedades do aço podem ser verificadas na [seção 4.8](#).

### 4.1 Vigas

Nas construções metálicas, quando para um dado momento atuante se consegue uma seção resistente empregando um perfil laminado isolado, isto é, sem haver necessidade de compor um perfil reunindo vários perfis para formar um todo resistente, diz-se que

Figura 13 – Estruturas de sustentação utilizadas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

é uma viga de perfil simples ([CARNASCIALI, 1978](#)). O primeiro modelo de galpão é constituído por vigas simples com perfil I laminado e servirão como mecanismo de suporte das telhas, tirantes e terças. De acordo com a [ABNT NBR 8800 \(2008\)](#), a escolha do perfil é feita a partir das verificações do Estado Limite Último e do Estado Limite de Serviço. A respeito do Estado Limite Último deve-se atentar ao índice de esbeltez, capacidade de resistência à cisalhamento, compressão e flexão e, ainda, à combinação desses dois últimos fatores. No que tange ao Estado Limite de Serviço, deverão ser respeitados os limites máximos quanto ao deslocamento vertical da estrutura, definido de acordo com o Anexo C da [ABNT NBR 8800 \(2008\)](#). Assim, deve atender às seguintes condições:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{L_x}{r_x} \leq 200 \\ \frac{L_y}{r_y} \leq 200 \end{array} \right\} \text{ condição do limite da esbeltez} \quad (4.1)$$

onde:

$L_x$  e  $L_y$  são os comprimentos destravados do elemento nas direções  $x$  e  $y$ , perpendicular e paralela à alma, respectivamente;

$r_x$  e  $r_y$  são os raios de giração nas direções  $x$  e  $y$ , respectivamente;

$$N_{c,Sd} \leq N_{c,Rd} \} \text{ condição da capacidade à compressão} \quad (4.2)$$

onde:

$N_{c,Sd}$  é a força axial de compressão solicitante de cálculo;

$N_{c,Rd}$  é a força axial de compressão resistente de cálculo;

$$M_{Sd} \leq M_{Rd} \} \text{ condição da capacidade à flexão} \quad (4.3)$$

onde:

$M_{Sd}$  é o momento fletor solicitante de cálculo;

$M_{Rd}$  é o momento fletor resistente de cálculo;

$$V_{Rd} \leq V_{Sd} \} \text{ condição da capacidade ao cisalhamento} \quad (4.4)$$

onde:

$V_{Rd}$  é a força cortante solicitante de cálculo;

$V_{Sd}$  é a força cortante resistente de cálculo;

$$\delta \leq \frac{L}{250} \} \text{ verificação do deslocamento vertical} \quad (4.5)$$

onde:

$L$  é o vão teórico entre apoios.

Segundo Bellei (2004), para um dimensionamento econômico, é necessária a colocação de contenções laterais na viga. Em vigas com altura menor do que 40 cm, pode-se usar as próprias terças para realizar essa função. Assim, há um travamento lateral nas vigas e diminuição do comprimento  $L_y$ , paralelo à alma. Na direção  $x$  não há nenhum travamento devido às próprias características geométricas das vigas, de serem constituídas por apenas um elemento. Dessa forma, o comprimento  $L_x$  é dado como o comprimento de uma das duas vigas que compõem o pórtico, enquanto para o comprimento  $L_y$  foi adotado o espaçamento entre terças.

## 4.2 Treliças

As treliças são constituídas por perfis cantoneira e, da mesma forma que o sistema com vigas, servirão como mecanismo de suporte das telhas, tirantes e terças. Os banzos superior e inferior são compostos por perfis duplos por serem as barras mais solicitadas,

enquanto as diagonais e montantes são formados por perfis cantoneira simples. De acordo com a [ABNT NBR 8800 \(2008\)](#), a escolha do perfil é feita a partir das verificações do Estado Limite Último e do Estado Limite de Serviço. Como o sistema de treliça é projetado para que não haja atuação de momentos fletores e forças cortantes nas barras, a capacidade de resistência em relação a esses fatores não é considerada. No entanto, deve-se verificar a capacidade de resistência a esforços axiais quanto à compressão e tração. No que tange ao Estado Limite de Serviço, deverão ser respeitados os limites máximos quanto ao deslocamento vertical da estrutura. Assim, deve atender às seguintes condições:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{L_x}{r_x} \leq 200 \\ \frac{L_y}{r_y} \leq 200 \end{array} \right\} \text{ condição do limite da esbeltez} \quad (4.6)$$

onde:

$L_x$  e  $L_y$  são os comprimentos destravados do elemento nas direções  $x$  e  $y$ , perpendicular e paralela ao plano da treliça, respectivamente;

$r_x$  e  $r_y$  são os raios de giração nas direções  $x$  e  $y$ , respectivamente;

$$N_{c,Sd} \leq N_{c,Rd} \} \text{ condição da capacidade à compressão axial} \quad (4.7)$$

onde:

$N_{c,Sd}$  é a força axial de compressão solicitante de cálculo;

$N_{c,Rd}$  é a força axial de compressão resistente de cálculo;

$$N_{t,Sd} \leq N_{t,Rd} \} \text{ condição da capacidade à tração axial} \quad (4.8)$$

onde:

$N_{t,Sd}$  é a força axial de tração solicitante de cálculo;

$N_{t,Rd}$  é a força axial de tração resistente de cálculo;

$$\delta \leq \frac{L}{250} \} \text{ verificação do deslocamento vertical} \quad (4.9)$$

onde:

$L$  é o vão teórico entre apoios.

Enquanto o banzo superior possui travamento na direção  $x$  devido às terças, o banzo inferior necessita de elementos que diminuam o comprimento de flambagem nessa direção. Assim, são colocadas mãos-francesas como sistemas de travamento. Já na direção  $y$ , o comprimento de flambagem é o próprio de cada barra.

## 4.3 Telhas

Os tipos de telhas metálicas existentes no mercado são caracterizados de acordo com suas dimensões e forma geométrica e apresentam grande diversidade. Os limites dimensionais são acompanhados de restrições quanto à distância máxima entre apoios e às cargas admissíveis, determinadas pela espessura dos perfis e número de apoios intermediários para fixação das telhas. As telhas trapezoidais possuem seção transversal constituída por uma sequência de trapézios. Será utilizada neste trabalho a telha trapezoidal 40, ou seja, trapézio com 40 mm de altura, revestida com zinco e alumínio. Além disso, pode-se encontrar telhas trapezoidais de até 12 m de comprimento. Assim, foi considerado que as telhas poderão possuir 4 apoios intermediários resultando em cargas admissíveis maiores.

O dimensionamento das telhas é feito basicamente através da verificação das cargas admissíveis e da combinação crítica de cálculo, mostrada na [seção 5.3](#).

As características das telhas utilizadas são regulamentadas pela [ABNT NBR 14514 \(2008\)](#) - Telhas de aço revestido de seção trapezoidal — Requisitos.

## 4.4 Terças

As terças são elementos dispostos no plano da cobertura e servirão de apoio para as telhas. Foram utilizados, por economia, perfis dobrados a frio, com seção tipo U. Como a [ABNT NBR 8800 \(2008\)](#) não cobre o dimensionamento de perfis metálicos, foi utilizado o método das tensões admissíveis para chapa fina e considerações feitas pelo [CBCA \(2003\)](#).

O dimensionamento usual pelo método das tensões admissíveis é indicado abaixo:

$$\left. \frac{f_{bx}}{0,6f_y} < 1 \right\} \text{ para combinação de cálculo sem carregamento do vento} \quad (4.10)$$

$$\left. \frac{f_{bx}}{0,6f_y} < 1,33 \right\} \text{ para combinação de cálculo com carregamento do vento} \quad (4.11)$$

onde:

$0,6f_y$  é a tensão admissível à flexão igual a 60% da tensão de escoamento do aço;

$f_{bx}$  é a tensão atuante de compressão ou tração, devido à flexão e deverá ser calculada para os eixos  $x$  e  $y$ , dado por:

$$f_{bx} = \frac{M}{W} \quad (4.12)$$

onde:

$M$  é momento fletor na direção considerada;

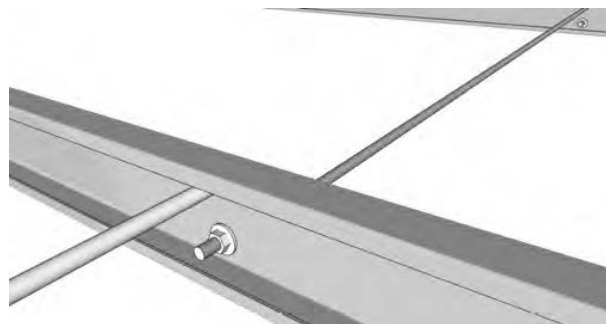
$W$  é módulo de resistência na direção considerada.

Para determinação do momento atuante na seção do meio do vão, mais crítico, são usadas duas combinações de cálculo para o estado limite último, detalhadas na [seção 5.4](#). Ainda, considera-se que as fixações das telhas sobre as terças evitarão problemas de flambagem lateral e torção.

## 4.5 Tirantes em Y

Os tirantes em Y são formados por barras redondas com extremidades rosqueadas, conforme a [Figura 14](#). Para o dimensionamento deste edifício industrial, foram utilizadas barras redondas treiladas posicionadas de modo a diminuir o vão efetivo e comprimento de flambagem das terças. A fixação, número e posicionamento dos tirantes varia conforme o número de terças da cobertura, mas, de modo geral, são posicionados na parte central do vão da terça de extremidade até a última terça antes da terça da cumeeira. A seguir, seguem dois tirantes até cada extremidade da cumeeira na seção transversal considerada. A área de influência dos carregamentos e o formato dos tirantes é mostrado na [Figura 15](#).

Figura 14 – Tirantes nas terças.



Fonte: ([CBCA, 2010](#))

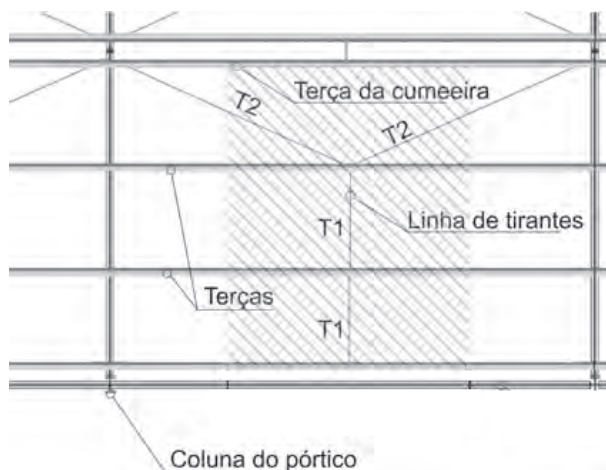
Segundo a [ABNT NBR 8800 \(2008\)](#), para o dimensionamento de barras redondas com extremidades rosqueadas verifica-se a menor resistência entre o escoamento da seção bruta e a ruptura da seção rosqueada quando submetida à tração. Utilizou-se a recomendação da [CBCA \(2010\)](#) de que o limite do índice de esbeltez não precisa ser avaliado, desde que as barras rosqueadas sejam colocadas com alguma pré-tensão.

A partir da combinação de cálculo crítica, detalhada na [seção 5.5](#), é obtida a força de tração solicitante de cálculo  $F_{t,Sd}$  para os trechos T1 e T2 da [Figura 15](#), de acordo com a área de influência dos tirantes.

Assim, deve ser atendida a condição:

$$F_{t,Sd} \leq F_{t,Rd} \} \text{ condição da capacidade à tração axial} \quad (4.13)$$

Figura 15 – Formato dos tirantes e área de influência.



Fonte: Adaptado (CBCA, 2010)

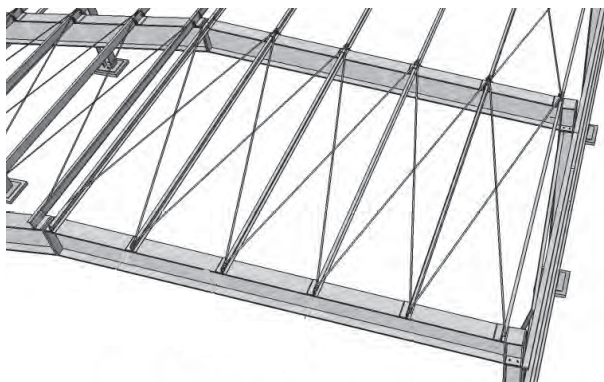
A obtenção da força de tração resistente de cálculo é detalhada no [Apêndice A](#).

## 4.6 Tirantes em X

Conforme recomendações do (CBCA, 2010), os contraventamentos dos planos da cobertura são colocados apenas nos vãos extremos para um galpão de 48 metros de comprimento, de maneira que possam ser capazes de resistir a ações devidas ao vento incidentes nos tapamentos frontais do galpão.

A rigidez do plano de contraventamento é obtida por diagonais colocadas na forma de “X” (Figura 16). Com atuação do vento, haverá solicitação do contraventamento e uma diagonal trabalhará tracionada e a outra, comprimida. As diagonais são compostas por barras redondas com extremidades rosqueadas, tal como nos tirantes da cobertura.

Figura 16 – Tirantes em X.



Fonte: Adaptado (CBCA, 2010)

A simplificação usual de dimensionamento é desconsiderar a existência de diagonais

comprimidas, considerando apenas a atuação das diagonais tracionadas, de forma a se obter um treliçado isostático de solução simples. Considera-se também que os tirantes são instalados com alguma pré-tensão, de modo que a flambagem das barras não precise ser considerada. O dimensionamento das barras é feito da mesma forma que para os tirantes da cobertura: verifica-se a menor resistência entre o escoamento da seção bruta e a ruptura da seção rosqueada quando submetida à tração, e compara-se à força de tração resistente de cálculo:

$$F_{t,Sd} \leq F_{t,Rd} \} \text{ condição da capacidade à tração axial} \quad (4.14)$$

## 4.7 Travamento do banzo inferior das treliças

No caso dos modelos com estruturas treliçadas, é necessário colocar elementos de contraventamento de modo a reduzir o comprimento de flambagem do banzo inferior na direção perpendicular ao plano da treliça. Caso esses elementos não sejam colocados, será necessária uma estrutura mais robusta e, conseqüentemente, maiores serão os acréscimos de custos em comparação à colocação de travamentos.

Os travamentos podem ser realizados de diversas formas, mas a solução adotada é através de mãos-francesas com perfil cantoneira simples. Esses elementos são colocados em determinados nós do banzo inferior e vão até as terças da cobertura com inclinação de 45 graus, de modo a garantir a eficiência dos mesmos na redução do comprimento de flambagem do banzo inferior das treliças. Assim, o número de contraventamentos é variável e será otimizado de modo a gerar a estrutura com menor custo. Além disso, o número de travamentos deverá ser compatível com o número de terças para garantir o correto posicionamento e fixação.

O dimensionamento dá-se, exclusivamente, pela verificação do índice de esbeltez dos perfis cantoneira, considerado como caso mais crítico. O índice de esbeltez limite foi retirado da [ABNT NBR 8800 \(2008\)](#) para barras submetidas à compressão. Assim, deve-se respeitar a condição:

$$\frac{L}{r_{min}} \leq 200 \} \text{ condição do limite da esbeltez} \quad (4.15)$$

onde:

$L$  é o comprimento destravado da mão francesa;

$r_{min}$  é o raio de giração mínimo do perfil cantoneira. Usa-se seu valor mínimo pois a flambagem do elemento pode ocorrer em qualquer direção.

Embora para a treliça do modelo 2 ([Figura 13](#)) a distância entre o nó do banzo inferior e a terça seja variável, variando o comprimento da mão-francesa, a mesma é dimensionada para seu caso mais crítico, ou seja, região em que há o maior comprimento.



Dessa forma, é utilizado o mesmo perfil cantoneira para todos os contraventamentos do banzo inferior nesse modelo.

## 4.8 Propriedades

As propriedades do aço utilizado para as barras das treliças, vigas, tirantes, contraventamentos e travamentos estão mostradas na [Tabela 1](#) e [Tabela 2](#). Para os perfis I foram usados dois tipos de aço. Ressalta-se que a maioria dos perfis das vigas possuem propriedades mecânicas melhores em relação aos outros elementos. O peso específico do aço,  $\gamma$ , vale  $77kN/m^3$ .

Tabela 1 – Propriedades do aço das terças, tirantes, contraventamentos, travamentos e treliças e vigas<sup>1</sup>

Módulo de elasticidade (E)	200 GPa
Módulo de elasticidade transversal (G)	77 GPa
Resistência ao escoamento ( $f_y$ )	250 MPa
Resistência última de ruptura ( $f_u$ )	400 MPa

Fonte: ([ABNT NBR 8800, 2008](#)).

Tabela 2 – Propriedades do aço para as vigas<sup>2</sup>

Módulo de elasticidade (E)	200 GPa
Módulo de elasticidade transversal (G)	77 GPa
Resistência ao escoamento ( $f_y$ )	345 MPa
Resistência última de ruptura ( $f_u$ )	450 MPa

Fonte: ([ABNT NBR 8800, 2008](#)).

Os custos unitários de cada elemento da cobertura foram obtidos através de orçamentos feitos em diversas lojas de materiais de construção localizados em Florianópolis. Para a otimização, foram utilizados valores referentes à massa utilizada de material e não à quantidade de elementos, ou seja, o custo por quilograma de aço.

<sup>1</sup> Perfis de índice 1 a 4

<sup>2</sup> Perfis de índice 5 a 51



## 5 Esforços solicitantes

Os carregamentos na estrutura do edifício industrial estudado são referentes a ações variáveis e permanentes. De acordo com a [ABNT NBR 8800 \(2008\)](#), ações variáveis são as que ocorrem com valores que apresentam variações significativas durante a vida útil da construção. Para a edificação analisada, as ações variáveis foram calculadas de acordo com o uso e ocupação da edificação e foi feita a consideração de ações decorrentes de sobrecargas e oriundas da ação do vento. Para a sobrecarga na cobertura, adotou-se o valor mínimo de  $250\text{N/m}^2$ . A [ABNT NBR 8681 \(2003\)](#) - Ações e segurança nas estruturas - Procedimento define as ações permanentes como aquelas que ocorrem com valores constantes ou de pequena variação durante a vida útil da construção. Foram constituídas pelo peso próprio da estrutura e dos elementos construtivos que compõem a cobertura, tais como treliças ou vigas, terças, tirantes, contraventamentos, travamentos e telhas.

Cada elemento constituinte da cobertura possui combinações de cálculo específicas. A partir delas, os elementos são dimensionados de modo que cumpram as especificações normativas. Os carregamentos de cálculo utilizados para cada elemento serão detalhados a seguir.

### 5.1 Efeitos de vento

As ações variáveis devidas ao vento foram dimensionadas levando-se em consideração as recomendações da [ABNT NBR 6123 \(1988\)](#). Considerou-se casos de carregamentos com esforços de vento à  $0^\circ$  e à  $90^\circ$ , conforme [Figura 17](#). A pressão dinâmica do vento é dada pela seguinte expressão:

$$q = 0,613K_k^2 \quad (5.1)$$

onde:

$V_k$  é a velocidade característica do vento, dada por:

$$V_k = V_0 S_1 S_2 S_3 \quad (5.2)$$

onde:

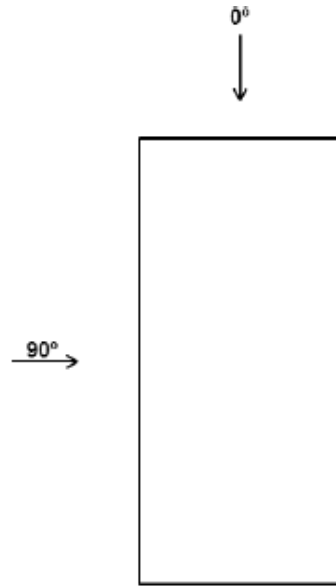
$V_0$  é a velocidade básica do vento, retirada do mapa das isopletras;

$S_1$  é o fator topográfico;

$S_2$  é o fator relativo à rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno;

$S_3$  é o fator estatístico.

Figura 17 – Direções dos Esforços de Vento – Vista superior.



Fonte: (FLÔR, 2015)

Supos-se um edifício industrial a ser construído em Florianópolis – Santa Catarina, com velocidade básica do vento de  $43 \text{ m/s}$ , a qual foi retirada das isopletas presentes na [ABNT NBR 6123 \(1988\)](#), assim como a ser construído em terreno plano, em uma região com baixo fator de ocupação ( $S_1 = 1$  e  $S_3 = 0,95$ ).

A força do vento depende da diferença de pressão nas faces interna e externa do telhado. Assim, são necessários coeficientes de pressão para calcular a pressão efetiva do vento  $\Delta p$ , que atua perpendicularmente à superfície do telhado:

$$\Delta p = (C_{pe} - C_{pi})q \quad (5.3)$$

onde:

$C_{pe}$  é o coeficiente de pressão externa;

$C_{pi}$  é o coeficiente de pressão interna.

Os coeficientes de pressão foram obtidos da [ABNT NBR 6123 \(1988\)](#) e seguem as mesmas considerações feitas por [CBCA \(2010\)](#).

Duas combinações de cálculo serão usadas somente para o dimensionamento das telhas, terças e ancoragens, pois nelas serão considerados os valores médios de coeficientes de pressão externa, definidos na [ABNT NBR 6123 \(1988\)](#). Outras quatro combinações serão utilizadas no dimensionamento dos elementos dos pórticos.

## 5.2 Viga/Treliça

De acordo com Flôr (2015), a consideração da ação permanente em conjunto com as ações variáveis de sobrecarga e ação do vento em um edifício residencial usual resulta em 10 possíveis combinações de carregamento para verificação do Estado Limite Último, mostradas da Equação 5.4 à Equação 5.13.

$$F_d = \gamma_g.W + \gamma_q^{SC}.SC \quad (5.4)$$

$$F_d = \gamma_g^V.W + \gamma_q^V.V_{0^\circ} \quad (5.5)$$

$$F_d = \gamma_g^V.W + \gamma_q^V.V_{90^\circ d} \quad (5.6)$$

$$F_d = \gamma_g^V.W + \gamma_q^V.V_{90^\circ e} \quad (5.7)$$

$$F_d = \gamma_g.W + \gamma_q^{SC}.SC + \psi_0^V.\gamma_q^V.V_{0^\circ} \quad (5.8)$$

$$F_d = \gamma_g.W + \gamma_q^{SC}.SC + \psi_0^V.\gamma_q^V.V_{90^\circ d} \quad (5.9)$$

$$F_d = \gamma_g.W + \gamma_q^{SC}.SC + \psi_0^V.\gamma_q^V.V_{90^\circ e} \quad (5.10)$$

$$F_d = \gamma_g.W + \gamma_q^V.V_{0^\circ} + \psi_0^{SC}.\gamma_q^{SC}.SC \quad (5.11)$$

$$F_d = \gamma_g.W + \gamma_q^V.V_{90^\circ d} + \psi_0^{SC}.\gamma_q^{SC}.SC \quad (5.12)$$

$$F_d = \gamma_g.W + \gamma_q^V.V_{90^\circ e} + \psi_0^{SC}.\gamma_q^{SC}.SC \quad (5.13)$$

sendo:

$W$  o peso próprio da estrutura;

$SC$  a sobrecarga atuante;

$V_{0^\circ}$ ,  $V_{90^\circ d}$  e  $V_{90^\circ e}$  os esforços de vento atuantes na direção  $0^\circ$  e na direção  $90^\circ$  no sentido direito e esquerdo da cobertura, respectivamente;

$\gamma_g$ ,  $\gamma_g^V$ ,  $\gamma_q^{SC}$ ,  $\gamma_q^V$  são coeficientes de ponderação e  $\psi_0^V$  e  $\psi_0^{SC}$  são fatores de combinação, sendo seus valores retirados da ABNT NBR 8800 (2008).

Conforme o proposto por Flôr (2015), durante o processo de otimização para a resolução dos problemas propostos, considerou-se apenas os casos de carregamentos

referentes as equações 5.4, 5.5, 5.6 e 5.7, pois segundo a autora, após uma verificação inicial, constatou-se que eram estes que resultavam nas combinações mais desfavoráveis. Assim, simplificou-se a análise visando a redução do tempo computacional.

Da mesma forma, para a verificação do Estado Limite de Serviço, considerou-se quatro casos de carregamentos considerados os mais críticos, mostrados nas equações 5.14, 5.15, 5.16 e 5.17

$$F_{serv} = W + \psi_1^{SC}.SC \quad (5.14)$$

$$F_{serv} = W + \psi_1^V.V_{0^\circ} + \psi_2^{SC}.SC \quad (5.15)$$

$$F_{serv} = W + \psi_1^V.V_{90^\circ d} + \psi_2^{SC}.SC \quad (5.16)$$

$$F_{serv} = W + \psi_1^V.V_{90^\circ e} + \psi_2^{SC}.SC \quad (5.17)$$

sendo  $\psi_1^{SC}$ ,  $\psi_1^V$  e  $\psi_2^{SC}$  fatores de redução, encontrados na ABNT NBR 8800 (2008). Como os carregamentos citados são dependentes da ação do vento, durante a otimização dos elementos há a atualização dos carregamentos de acordo com a inclinação da cobertura.

### 5.3 Telhas

Foram consideradas duas combinações de cálculo de modo a dimensionar a espessura das telhas. A primeira combinação considerou o peso próprio das telhas e sobrecarga e a segunda considerou o peso próprio das telhas e a ação do vento contrária ao peso próprio, atuando como sucção.

$$F_d = \gamma_g.W + \gamma_q^{SC}.SC \quad \text{peso próprio + sobrecarga} \quad (5.18)$$

$$F_d = \gamma_g^V.W + \gamma_q^V.V \quad \text{peso próprio + vento} \quad (5.19)$$

sendo:

$W$  o peso próprio das telhas;

$SC$  a sobrecarga atuante;

$V$  a pressão efetiva do vento;

$\gamma_g$ ,  $\gamma_g^V$ ,  $\gamma_q^{SC}$ ,  $\gamma_q^V$  são coeficientes de ponderação, citados na seção 5.2.

## 5.4 Terças

As terças foram dimensionadas a partir de duas combinações de cálculo, iguais às das telhas. No entanto, o peso próprio e a sobrecarga são verticais e terão que ser decompostos nas direções  $x$  e  $y$ , paralela e perpendicular ao plano da cobertura, respectivamente, enquanto a ação do vento é perpendicular ao plano de cobertura;

$$\left. \begin{aligned} F_{d,x} &= \gamma_g.W.\cos\theta + \gamma_q^{SC}.SC.\cos\theta \\ F_{d,y} &= \gamma_g.W.\sin\theta + \gamma_q^{SC}.SC.\sin\theta \end{aligned} \right\} \quad \text{peso próprio + sobrecarga} \quad (5.20)$$

$$\left. \begin{aligned} F_{d,x} &= \gamma_g^V.W.\cos\theta + \gamma_q^V.V \\ F_{d,y} &= \gamma_g^V.W.\sin\theta + \gamma_q^V.V \end{aligned} \right\} \quad \text{peso próprio + vento} \quad (5.21)$$

sendo:

$W$  o peso próprio das telhas, terças e tirantes da cobertura;

$SC$  a sobrecarga atuante;

$V$  a pressão efetiva do vento;

$\theta$  a inclinação do telhado;

$\gamma_g, \gamma_g^V, \gamma_q^{SC}, \gamma_q^V$  são coeficientes de ponderação, citados na [seção 5.2](#).

## 5.5 Tirantes em Y

Os tirantes da cobertura, como já mencionado, possuem formato de Y e atuam a fim de reduzir o comprimento de flambagem das terças na direção de menor momento de inércia. Segundo [CBCA \(2010\)](#), a combinação crítica de cálculo é a que segue:

$$F_d = \gamma_g.W + \gamma_q^{SC}.SC \quad (5.22)$$

sendo:

$W$  o peso próprio das telhas;

$SC$  a sobrecarga atuante;

$\gamma_g, \gamma_q^{SC}$  são coeficientes de ponderação, citados na [seção 5.2](#).

## 5.6 Tirantes em X

O limite de esbeltez a compressão é desconsiderado ao aplicar pré-tensão nas barras. A força de tração solicitante de cálculo atuando nas diagonais é calculada dividindo a

incidência dos esforços de vento em regiões de influência. A força crítica na barra será dada pela pressão efetiva do vento multiplicada pela área de influência:

$$F_{t,sd} = \gamma_q^V \cdot V \cdot b \cdot \frac{H}{2} \quad (5.23)$$

onde:

$V$  é a pressão efetiva do vento;

$b$  é o espaçamento entre terças;

$H$  é a distância do solo até o ponto mais alto do telhado;

$\gamma_q^V$  é um coeficiente de ponderação, citado na [seção 5.2](#).

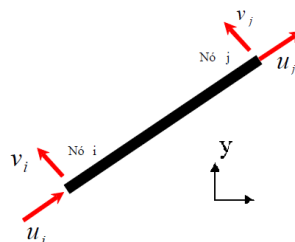
## 5.7 Análise estrutural

A análise estrutural das treliças e das vigas foi realizada através do Método dos Deslocamentos devido à facilidade de implementação em rotinas computacionais ([SORIANO, 2005](#)). O método consiste na determinação das deslocamentos e rotações sofridas pelos nós das diversas barras da estrutura para, a partir desses valores, obter os esforços solicitantes ([MAU, 2015](#)). A idéia básica é determinar, dentro do conjunto de soluções em deslocamentos que satisfazem as condições de compatibilidade, qual a solução que faz com que as condições de equilíbrio também sejam satisfeitas ([MARTHA, 2010](#)). Considerou-se o material no regime elástico-linear, com pequenas deformações e pequenos deslocamentos.

Ambas as treliças e vigas foram analisadas no plano da seção transversal de cada pórtico, embora o galpão tenha dimensões espaciais, com largura, comprimento e altura.

As barras das treliças estão submetidas apenas a efeitos axiais. Assim, cada barra possui quatro graus de liberdade, referentes aos deslocamentos nas duas direções do plano  $xy$  ([Figura 18](#)). Já as vigas de alma cheia, além dos esforços axiais, estão sujeitas à flexão e possuem seis graus de liberdade cada barra, referentes aos deslocamentos e rotações ([Figura 19](#)).

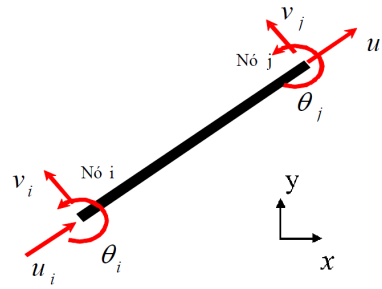
Figura 18 – Graus de liberdade de uma treliça plana.



Fonte: Adaptado ([QUEIROZ, 2010](#))



Figura 19 – Graus de liberdade de um pórtico plano.



Fonte: Adaptado ([QUEIROZ, 2010](#))

Os esforços são encontrados a partir da resolução da seguinte equação:

$$f = Kd \quad (5.24)$$

onde:

$f$  é o vetor das forças da estrutura;

$K$  é a matriz de rigidez para a estrutura;

$d$  é o vetor de deslocamentos de todos os nós, a ser determinado;



## 6 Modelos de Cobertura

Buscou-se realizar o dimensionamento e otimização de três modelos de cobertura para um edifício industrial, a fim de gerar o menor custo global para a estrutura (Figura 20).

Cada modelo foi dimensionado e otimizado para diversas larguras de modo a poder analisar a influência da largura na escolha de cada modelo. Assim, é possível determinar intervalos de largura ideais para cada modelo, em que um será mais vantajoso do que outro, auxiliando na escolha do melhor tipo de cobertura. Para fazer uma comparação justa, a estrutura do telhado, com terças, telhas e tirantes foi mantida a mesma para os três modelos. A vista superior do galpão para os três modelos pode ser visualizada na Figura 21.

O dimensionamento levou em consideração a otimização dimensional, otimização geométrica e otimização topológica da cobertura, com definição da espessura da telha metálica, número de terças, número de travamentos no banzo inferior das treliças, distância entre pórticos, entre outros.

### 6.1 Modelo 1

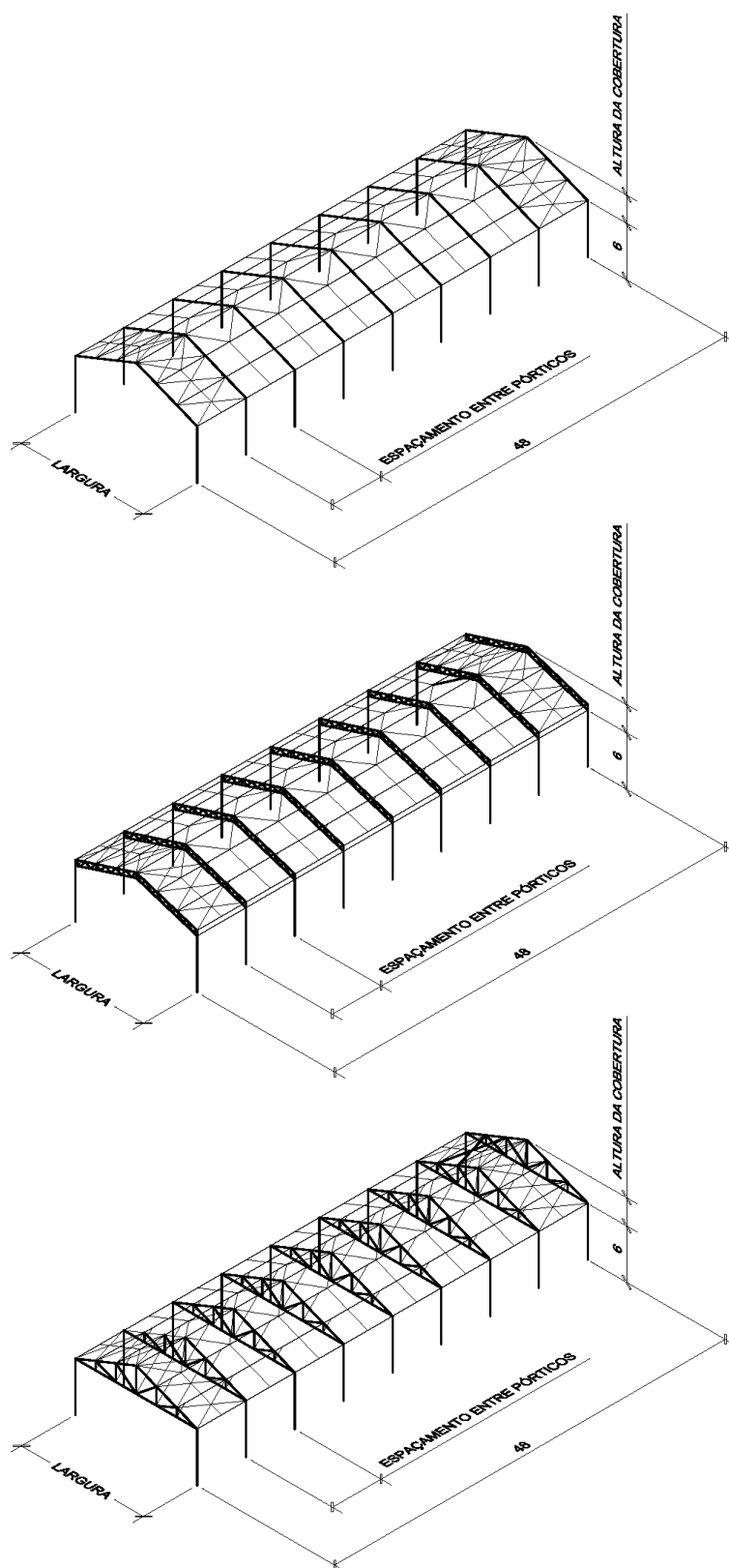
O modelo 1 é constituído por duas vigas com perfil I (Figura 22) e a cobertura também possui terças, tirantes da cobertura, telha e elementos de contraventamento da cobertura (Figura 23). Para a otimização, foram adotadas oito variáveis de projeto, conforme a Tabela 3:

Tabela 3 – Variáveis de projeto para o modelo 1

Variável de projeto	Tipo	Domínio	
		Limite inferior	Limite superior
Perfil I das vigas	Discreta	1	51
Perfil das telhas	Discreta	1	6
Máxima distância entre apoios das telhas	Discreta	1	6
Perfil das terças	Discreta	1	15
Perfil dos tirantes em X	Discreta	1	8
Perfil dos tirantes em Y	Discreta	1	8
Altura da cobertura	Contínua	Vão.0,05	Vão.0,50
Espaçamento entre pórticos	Discreta	1	25

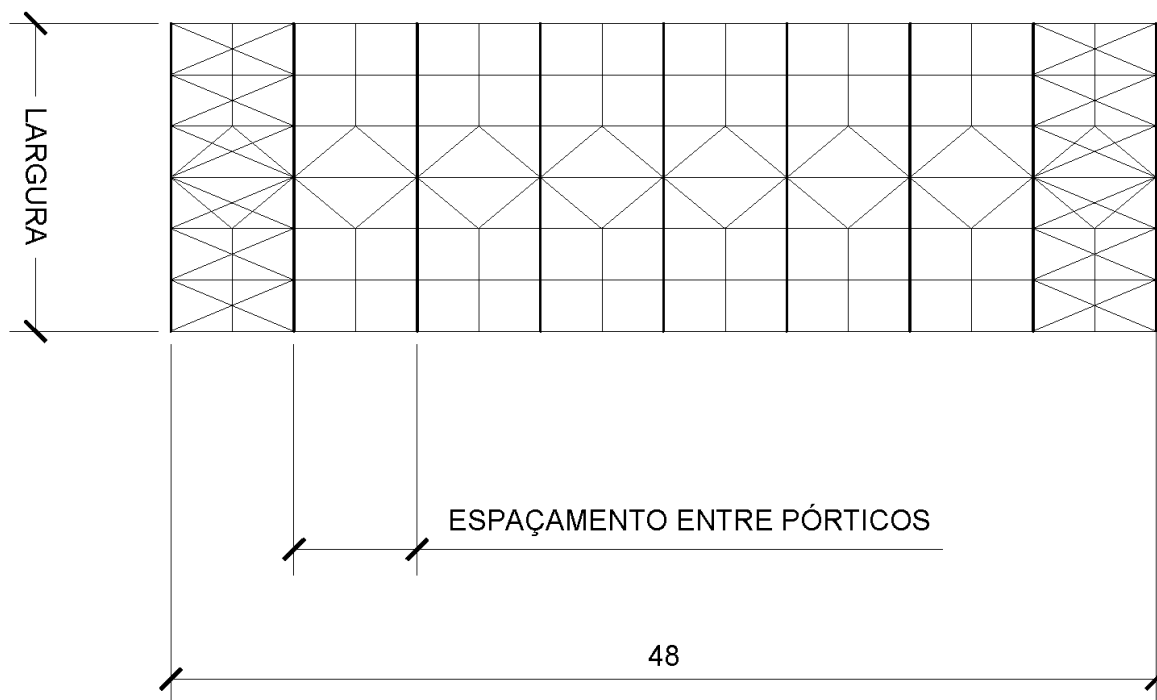
Quando é realizado o dimensionamento de estruturas metálicas, é necessário tomar cuidado quanto às limitações construtivas. Como exemplo, pode-se citar a limitação em relação a escolha dos perfis a serem utilizados, não podendo, simplesmente, adotar o perfil com as melhores propriedades. Deve-se atentar aos perfis disponíveis no mercado e o dimensionamento será em função destes. Em relação ao perfil dos elementos das vigas,

Figura 20 – Modelos de cobertura do galpão - dimensões em metros.



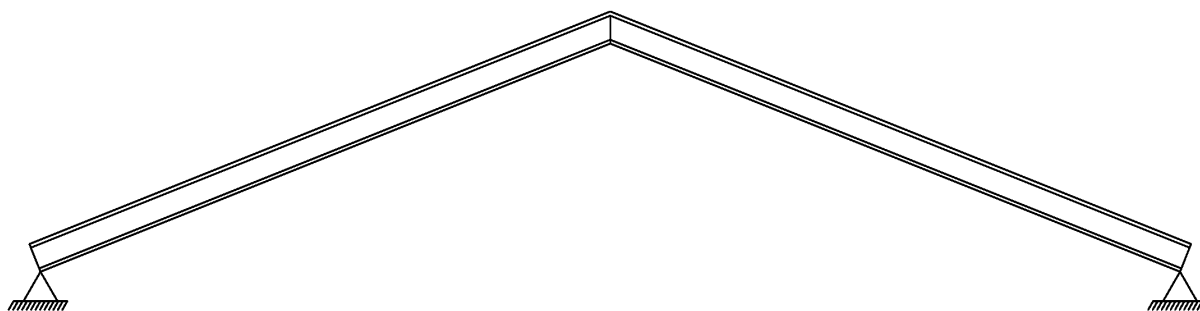
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 21 – Vista superior dos três modelos - dimensões em metros.



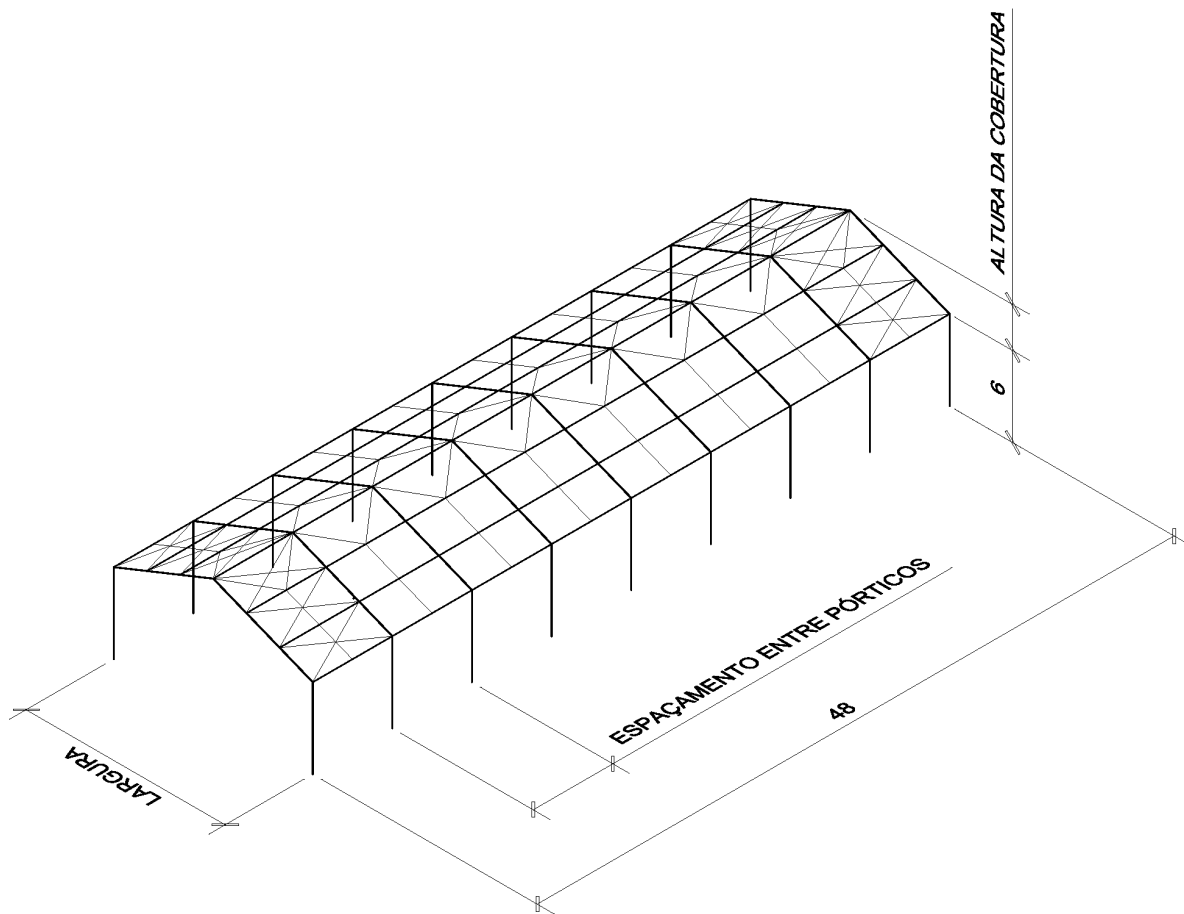
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 22 – Vista em corte do modelo 1.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 23 – Vista em perspectiva do modelo 1.



Fonte: Elaborado pelo autor.

telhas, terças e tirantes, adotou-se variáveis discretas de modo a selecionar um perfil com as características geométricas dispostas em uma lista. As características de todos os elementos estão dispostas no [Apêndice B](#). Assim, a otimização resulta na escolha do melhor conjunto de perfis, de modo a diminuir o custo da cobertura.

Para o dimensionamento das telhas, foram utilizadas duas variáveis de projeto discretas de modo a obter o valor das cargas admissíveis, definidas como a espessura das telhas e distâncias entre apoios, mostradas na [Tabela 14](#). A distância entre apoios trata-se do maior vão permitido para as telhas, de acordo com sua espessura, para que não haja colapso, ou seja, define o espaçamento máximo permitido entre as terças. A seguir, pôde-se determinar o número de terças utilizadas na cobertura de modo que o espaçamento efetivo entre terças seja imediatamente menor do que o espaçamento máximo permitido. Dessa forma, tem-se a otimização do número de terças em função da espessura das telhas e distância entre apoios.

O espaçamento entre pórticos sucessivos foi definido como variável discreta e de

modo a ser múltiplo do comprimento do galpão (48 metros). Assim, pode-se determinar o número de pórticos do galpão em função do espaçamento dos mesmos. Todas as opções disponíveis para número de pórticos e respectivos espaçamentos equivalentes são mostrados na [Tabela 4](#). De modo geral, se o espaçamento entre pórtico for muito grande, a estrutura deverá ser muito robusta e, conseqüentemente, maior será o custo. Por outro lado, ao se utilizar espaçamentos pequenos, embora um pórtico tenha um custo baixo, o custo total será elevado devido ao número de pórticos utilizados.

Tabela 4 – Opções de espaçamento e número de pórticos

Número de pórticos	Espaçamento entre pórticos
2	48,00
3	24,00
4	16,00
5	12,00
6	9,60
7	8,00
8	6,86
9	6,00
10	5,33
11	4,80
12	4,36
13	4,00
14	3,69
15	3,43
16	3,20
17	3,00
18	2,82
19	2,67
20	2,52
21	2,40
22	2,28
23	2,18
24	2,08
25	2,00

Fonte: Elaborado pelo autor

A altura da cobertura foi definida como variável contínua e está relacionada a diversos fatores. Inicialmente, o código feito no *MATLAB*<sup>®</sup> gera a estrutura com 3 nós e 2 elementos de modo a considerar apenas as duas vigas da estrutura no dimensionamento, sendo que a coordenada vertical dos nós está associada à altura da cobertura. Os limites inferior e superior do domínio dessa variável são dependentes da largura do galpão de modo a respeitar o limite mínimo inclinação do telhado. Segundo a [ABNT NBR 8800 \(2008\)](#), a inclinação deve ser de, no mínimo, 5% para que não haja empoçamento progressivo e não sejam necessárias verificações adicionais. Essa consideração assegura que não ocorrerá colapso estrutural causado pelo peso próprio da água acumulada em virtude das flechas dos materiais da cobertura e componentes estruturais. A inclinação da cobertura também está relacionada às ações de vento na estrutura, sendo que quando mais inclinada for, menor será a solicitação do vento favorável à sucção. As telhas são responsáveis pela

determinação do espaçamento máximo entre terças. No entanto, o espaçamento efetivo está relacionado ao espaço disponível para distribuição das terças, ou seja, uma das águas do telhado, dependente da largura do galpão e da altura da cobertura.

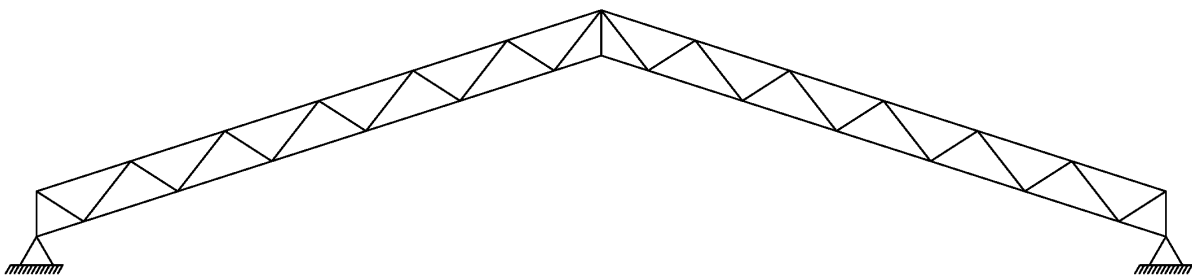
Após a determinação do número de terças, há a atualização do número de nós e de elementos da estrutura e o código gera as coordenadas dos nós em função do espaçamento entre terças e da altura da cobertura. A seguir, são feitas as combinações de cálculo para todos os elementos, considerando o peso próprio dos perfis selecionados, a sobrecarga e as cargas de vento em função da inclinação e altura da cobertura; e as capacidades resistentes para cada elemento. Caso as condições para os estados-limites últimos e de serviço não sejam atendidas, é aplicada uma penalidade à função objetivo de modo a descartar o conjunto de variáveis utilizado.

Ao realizar uma análise combinatória considerando todas as possíveis combinações de cada variável, chega-se em um total da ordem de  $10^{15}$  combinações. Portanto, a escolha do melhor conjunto de variáveis requer um bom poder computacional.

## 6.2 Modelo 2

O modelo 2 é constituído por treliças com perfis cantoneiras simples e duplos (Figura 24) e a cobertura possui telhas, terças, tirantes em X, tirantes em Y e mãos francesas (Figura 25). Para a otimização, foram adotadas dezesseis variáveis de projeto, conforme a Tabela 5.

Figura 24 – Vista em corte do modelo 2.

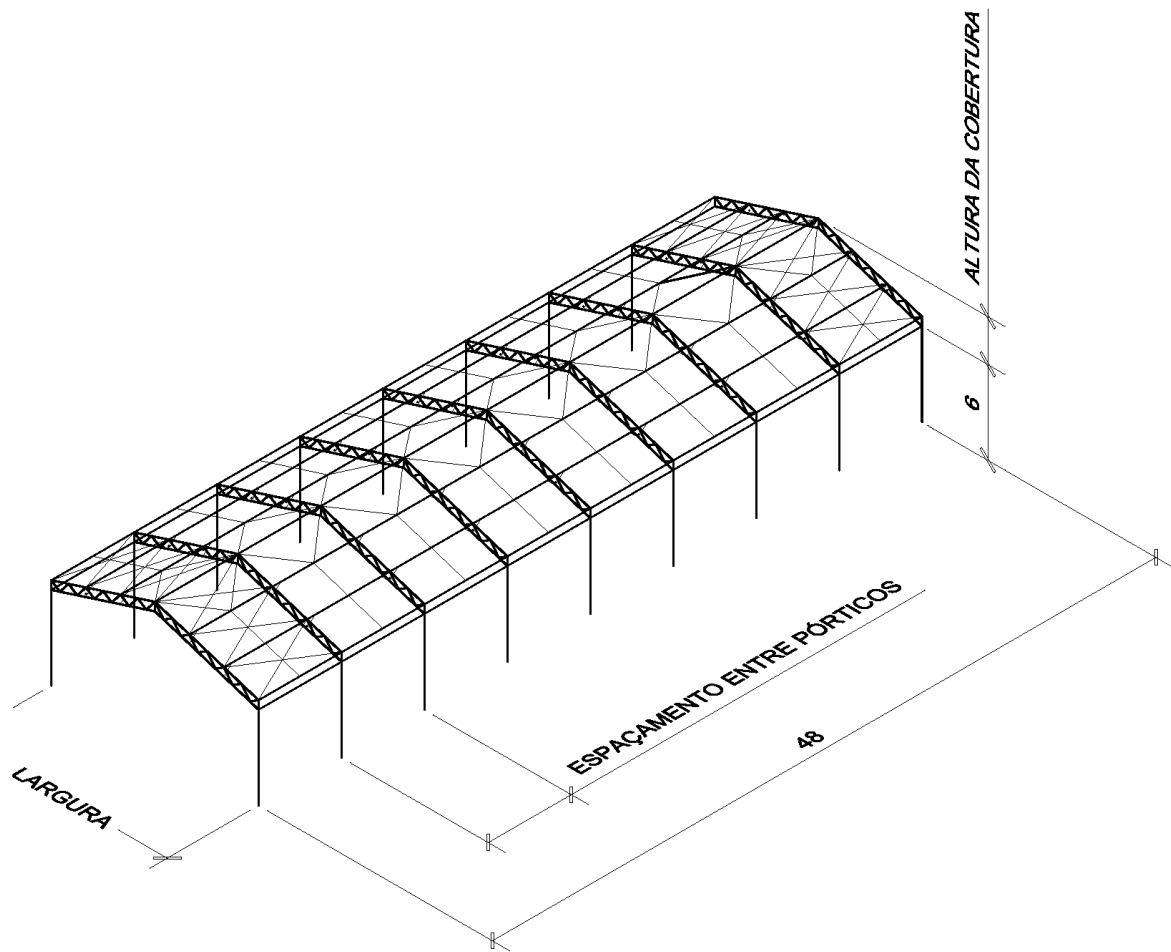


Fonte: Elaborado pelo autor.

Os perfis de cada elementos foram adotados como variáveis discretas de modo a testar os perfis fornecidos pelo catálogo de fabricantes, tal como para o modelo 1. Para a treliça, foram separados quatro grupos de perfis cantoneira, utilizados no banzo inferior, no banzo superior, nas diagonais e nos montantes verticais. Nos banzos inferior e superior foram adotados perfis duplos com cantoneiras ligadas por uma aba devido à



Figura 25 – Vista em perspectiva do modelo 2.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 5 – Variáveis de projeto para o modelo 2

Variável de projeto	Tipo	Domínio	
		Limite inferior	Limite superior
Perfil das barras do banzo inferior	Discreta	1	17
Perfil das barras do banzo superior	Discreta	1	17
Perfil das barras das barras inclinadas	Discreta	1	17
Perfil das barras das barras dos montantes	Discreta	1	17
Perfil das telhas	Discreta	1	6
Máxima distância entre apoios das telhas	Discreta	1	6
Perfil das terças	Discreta	1	15
Perfil dos tirantes em X	Discreta	1	8
Perfil dos tirantes em Y	Discreta	1	8
Perfil da mão-francesa	Discreta	1	5
Altura da cobertura	Contínua	Vão.0,05	Vão.0,50
Espaçamento entre pórticos	Discreta	1	25
Espaçamento entre banzos da treliça	Contínua	0,30	0,90
Número de divisões do banzo superior	Discreta	3	32
Número de terças	Discreta	6	32
Número de travamentos do banzo inferior da treliça	Discreta	6	32

maior solicitação ser nesses elementos. Nas diagonais e montantes foram utilizados perfis cantoneira simples.

As considerações feitas para a escolha dos perfis das telhas do modelo 1 valem também para o modelo 2, com duas variáveis discretas: uma para escolha da distância entre apoios e a outra para escolha da espessura da telha. A escolha do espaçamento entre pórticos sucessivos é realizada da mesma forma que para o modelo 1, com espaçamento múltiplo do comprimento do galpão, definido na [Tabela 4](#).

Para esse modelo, a escolha do número de terças da cobertura é feita diretamente através de uma variável discreta, ao invés de ser indiretamente calculada em função das telhas. Isso, pois o número de possibilidades de arranjo para as terças é maior para esse modelo. Ressalta-se que o código foi desenvolvido para que fossem realizados todas as combinações possíveis do número de terças, em função da topologia da treliça. Como exemplo, a treliça da [Figura 24](#) poderia assumir, alternativamente, 6 ou 14 terças, além do caso com 8 terças. A seguir, é possível calcular o espaçamento efetivo entre terças.

Outra diferença em relação ao modelo 1 é a inclusão de mãos-francesas de modo a realizar o travamento do banzo inferior da treliça. A escolha do perfil é feita da mesma forma que para os outros elementos, enquanto o número de travamentos é definido de maneira similar às terças, sendo possível ter tantas combinações para o número de travamentos quanto permita a topologia da estrutura.

Adicionalmente, a topologia da treliça é otimizada em função de uma variável discreta que determina o número de divisões do banzo inferior. É em função dessa variável que se define o número de nós e de elementos que a treliça irá possuir. Com a alteração da topologia da treliça, há também a mudança das combinações possíveis para o número de terças e travamentos e, conseqüentemente, da disposição dos tirantes. O número e posição dos tirantes está relacionado ao número de terças da cobertura, assim como para os outros modelos. O código desenvolvido no *MATLAB*® permite a alocação automática das coordenadas do nós e monta a matriz de conectividades dos elementos de acordo com as variáveis de projeto.

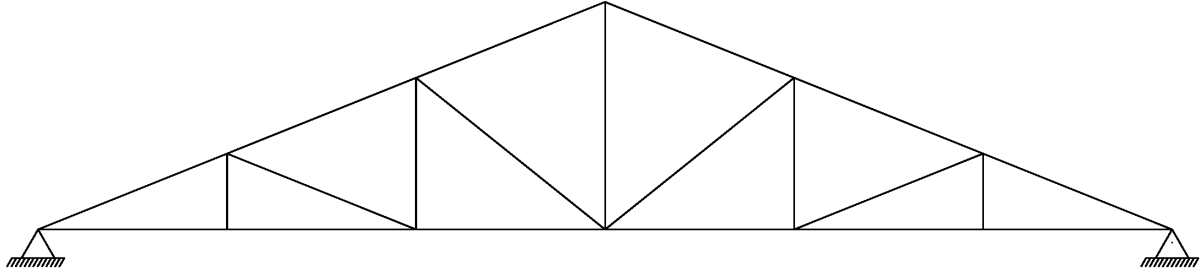
Para esse modelo, são possíveis da ordem de  $10^{17}$  combinações para as variáveis de projeto.

### 6.3 Modelo 3

O modelo 3 possui os mesmos elementos do modelo 2, porém com o arranjo diferente, conforme a [Figura 26](#) e a [Figura 27](#). Para a otimização, foram adotadas vinte e nove variáveis de projeto, sendo dezessete destinadas à otimização dimensional. Dentre essas dezessete variáveis, duas representam o perfil cantoneira utilizado no banzo inferior e

superior, enquanto as outras quinze são alocadas para o perfil das barras inclinadas e montantes conforme a necessidade. As variáveis de projeto estão listadas na [Tabela 6](#)

Figura 26 – Vista em corte do modelo 3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

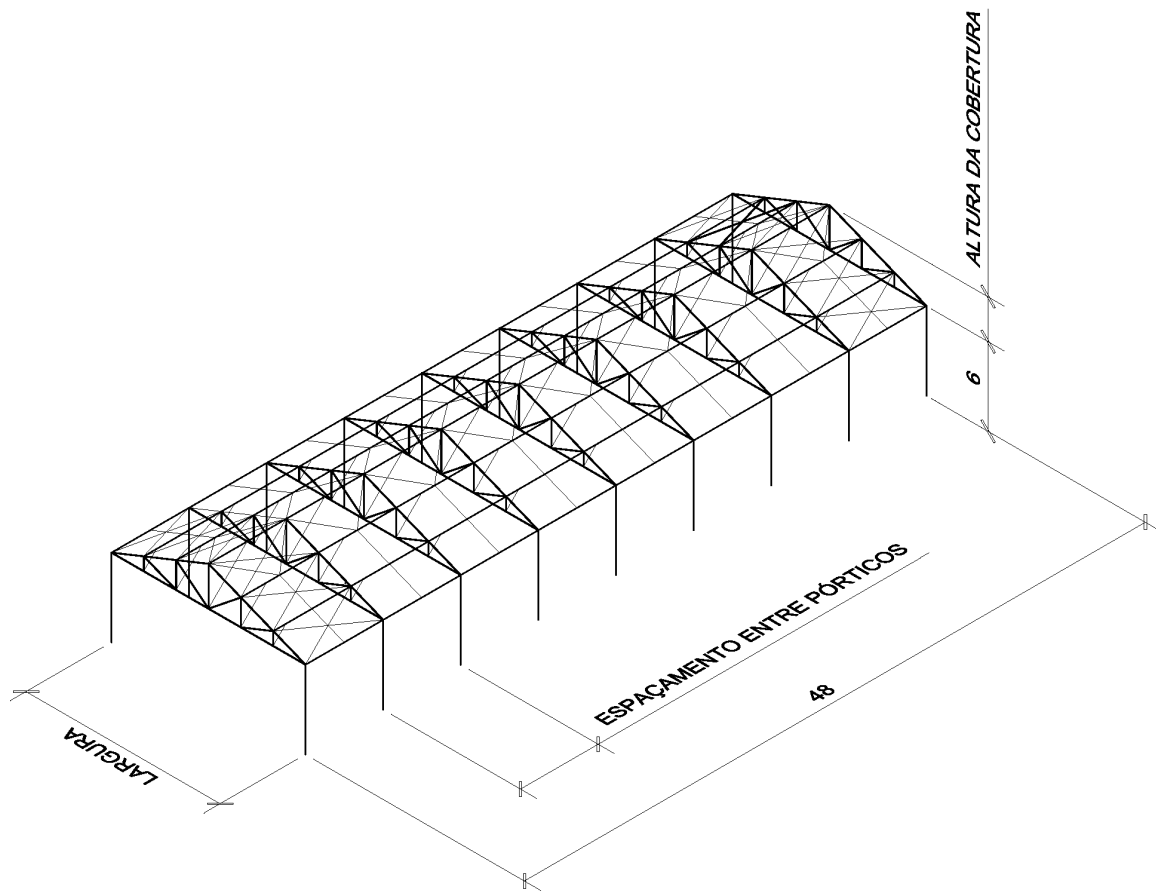
Tabela 6 – Variáveis de projeto para o modelo 3

Variável de projeto	Tipo	Domínio	
		Limite inferior	Limite superior
Perfil das barras do banzo inferior	Discreta	1	17
Perfil das barras do banzo superior	Discreta	1	17
Perfil das barras das barras inclinadas	Discreta	1	17
Perfil das barras das barras dos montantes	Discreta	1	17
Perfil das telhas	Discreta	1	6
Máxima distância entre apoios das telhas	Discreta	1	6
Perfil das terças	Discreta	1	15
Perfil dos tirantes em X	Discreta	1	8
Perfil dos tirantes em Y	Discreta	1	8
Perfil da mão-francesa	Discreta	1	5
Altura da cobertura	Contínua	Vão.0,05	Vão.0,50
Espaçamento entre pórticos	Discreta	1	25
Número de divisões do banzo inferior	Discreta	1	8
Número de terças	Discreta	6	32
Número de travamentos do banzo inferior da treliça	Discreta	6	32
Topologia da treliça	Discreta	1	3

O funcionamento do código desenvolvido no *MATLAB*<sup>®</sup> é similar aos outros dois modelos. Todas as considerações feitas para o modelo 2, em relação a escolha dos perfis dos elementos, são válidas também para o modelo 3.

Uma particularidade implementada no modelo 3 é a inserção de uma variável que atua na escolha de um modelo de topologia pré-estabelecido. As opções de topologia disponíveis podem ser visualizadas na [Figura 28](#). Enquanto para o modelo 1 não há otimização topológica das vigas devido às características geométricas e para as treliças do modelo 2 ela é feita por meio da variação do número de divisões do banzo inferior, no modelo 3 o modo como as barras estão dispostas permite que outros arranjos sejam feitos, além da mudança do número de espaçamentos do banzo inferior. Os métodos de otimização topológica usualmente empregados em treliças se baseiam em uma estrutura de partida,

Figura 27 – Vista em perspectiva do modelo 3.

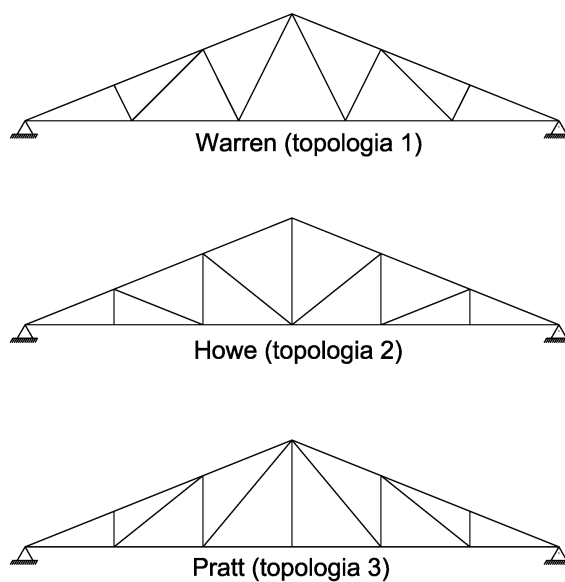


Fonte: Elaborado pelo autor.

que contém todas as conectividades possíveis entre os nós (*ground structure*) e durante a otimização, permite-se que sejam descartadas algumas barras (SOUZA, 2014). No entanto, esse método não leva em consideração as limitações construtivas das estruturas, podendo apresentar, entre outras, cruzamento de barras em que a execução não é possível. Assim, foram considerados os três modelos de topologias mais usuais na construção de edifícios industriais. A treliça pode assumir qualquer forma entre os modelos Warren, Pratt e Howe, que são comumente usados para dimensionamento de coberturas, como pode ser visto em Tisot, Medeiros e Kripka (2010).

Destaca-se que as variáveis de projeto utilizadas para os três modelos são dependentes umas das outras e a escolha do melhor conjunto é um processo que demanda muitas iterações. Para esse modelo são possíveis da ordem de  $10^{28}$  combinações de variáveis de projeto. Como mencionado, após uma análise inicial, o domínio de cada variável foi ajustado de modo a reduzir o número de combinações e, consequentemente, o tempo computacional.

Figura 28 – Topologias utilizadas para o modelo 3.



Fonte: Elaborado pelo autor.



## 7 Resultados

### 7.1 Modelo 1

O modelo com vigas de alma cheia foi otimizado com  $it^{max} = 20000$ . Nas Tabelas 15, 16 e 17 podem ser visualizados os resultados obtidos para a estrutura otimizada, calculados para diversas larguras do galpão.

De acordo com os resultados, o perfil I utilizado para as vigas sempre era aquele com maior raio de giração no eixo perpendicular à alma, em comparação com os de mesma área da seção transversal. Isso indica que um dos principais fatores a serem considerados é a verificação do índice de flambagem do elemento. No caso de pórticos com vigas de alma cheia, o comprimento destravado no eixo de maior momento de inércia é extenso e necessita de um raio de giração elevado para conter a flambagem nessa direção. De acordo com o fornecedor de estruturas em aço, perfis das séries W150, W200, W250 e W310 possuem o mesmo valor comercial. Por isso, para emprego de perfis I em edifícios industriais, é preferível o uso de bitolas de séries maiores a fim de resistir aos efeitos de flambagem. Outra solução é diminuir o comprimento de flambagem na direção perpendicular à alma através da colocação de mãos-francesas que ligam a mesa inferior do perfil I às terças. No entanto, após realizar um estudo com comprimento destravado nessa direção igual ao espaçamento entre terças, percebe-se que essa solução não é viável. Os custos são exatamente os mesmos do que para a consideração inicial, mas há adição dos custos dos travamentos com mãos-francesas. Assim, quando se dispõem de perfis com mesmo custo unitário e massa linear, é indicado o uso daquele que possuir maior raio de giração. Caso contrário, pode-se considerar a colocação de sistemas de travamento lateral para diminuição do comprimento de flambagem.

Verificou-se que foi utilizado, para todos os vãos, o menor perfil de telha disponível. Em consequência disso, o espaçamento entre terças foi bem menor do que o máximo permitido, ficando, em média, em 1,72 metros, enquanto o máximo permitido é de 3,00 metros. Aliado a isso, o espaçamento entre pórticos foi menor, ficando geralmente entre 3 e 4 metros de modo a diminuir a região de influência sobre as telhas. Isso se justifica pois as telhas possuem um custo consideravelmente mais alto em relação aos perfis U de chapa dobrada, utilizado nas terças, e perfil I, utilizado nas vigas. Em relação aos perfis U, as telhas são 26,1% mais caras e em relação aos perfis I, o percentual é ainda maior, com 44%. Assim, é mais vantajoso gastar mais com vigas e terças e economizar em telhas.

Existem duas possibilidades de emprego para as terças: perfis mais robustos implicam em menor número de terças enquanto perfis menos robustos implicam em maior número.

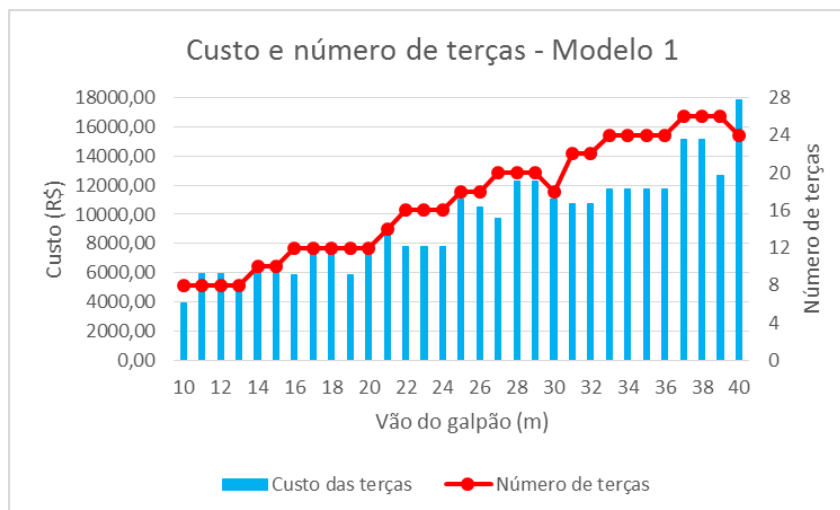


Figura 29 – Número de terças e seu respectivo custo para cada vão - Modelo 1

Por vezes, o uso de menor número de terças de perfis mais robustos resulta em uma estrutura mais cara. Isso fica visível através da [Figura 29](#) para os vãos de 39 e 40 metros ao relacionar o número de terças com seu respectivo custo.

Observa-se que, conforme a largura do galpão aumenta e caso o número de terças se mantenha o mesmo, o espaçamento entre pórticos diminui. Isso, para que a área de influência de carregamentos seja mantida aproximadamente a mesma e possa se usar a telha de menor espessura. No entanto, quando o espaçamento entre pórticos diminui, caso a área de influência dos carregamentos diminua, pode acontecer de ser necessário um perfil I menor para as vigas, como no caso da otimização para larguras de 18 e 19 metros.

A inclinação do telhado não manteve um padrão para as diferentes larguras. Ela está relacionada a todas as outras variáveis, depende de uma série de fatores e se ajusta a eles de modo a gerar o menor custo para a estrutura. São identificadas duas situações distintas: uma inclinação menor irá resultar em menor consumo de materiais, principalmente de telhas, mas também possuirá coeficientes de pressão externa maiores, aumentando os esforços de vento e necessitando de perfis mais robustos. Por outro lado, telhados mais inclinados terão maiores gastos em materiais de acordo com a geometria da estrutura, mas os esforços de vento serão menores. Assim, a inclinação para larguras menores ficou em torno de 8% enquanto para valores de largura entre 20 e 40 metros a predominância foi de inclinações em torno de 32%. Isso acontece porque o custo da cobertura em função apenas da inclinação do telhado possui dois mínimos. O mínimo global dependerá do vão do edifício industrial sendo que o vento terá efeito menos significativo para vãos menores, por isso resulta em inclinações menores para o telhado, enquanto para vãos maiores os efeitos do vento são mais significativos e isso resulta em telhados mais inclinados.

As Figuras [30](#) e [31](#) mostram a composição do custo total, de acordo com cada elemento, para o Modelo 1.



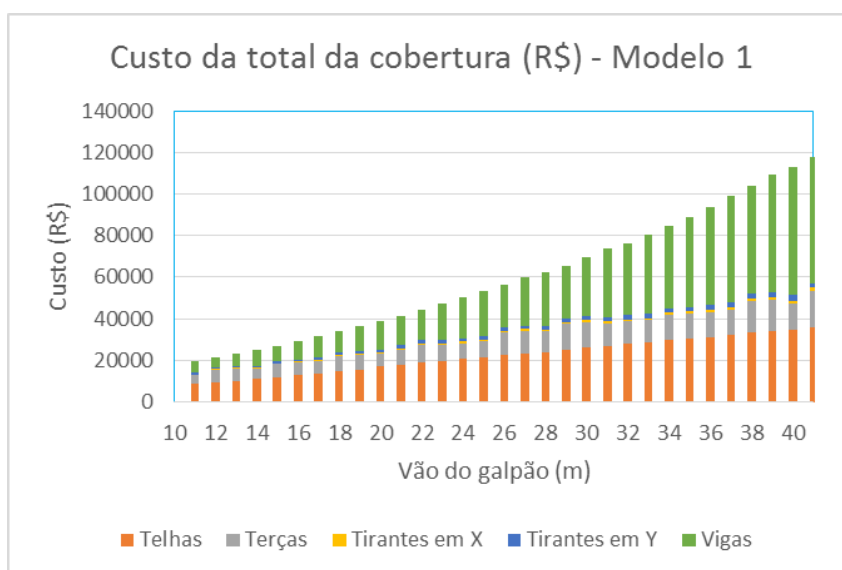


Figura 30 – Custo em reais para cada elemento - Modelo 1

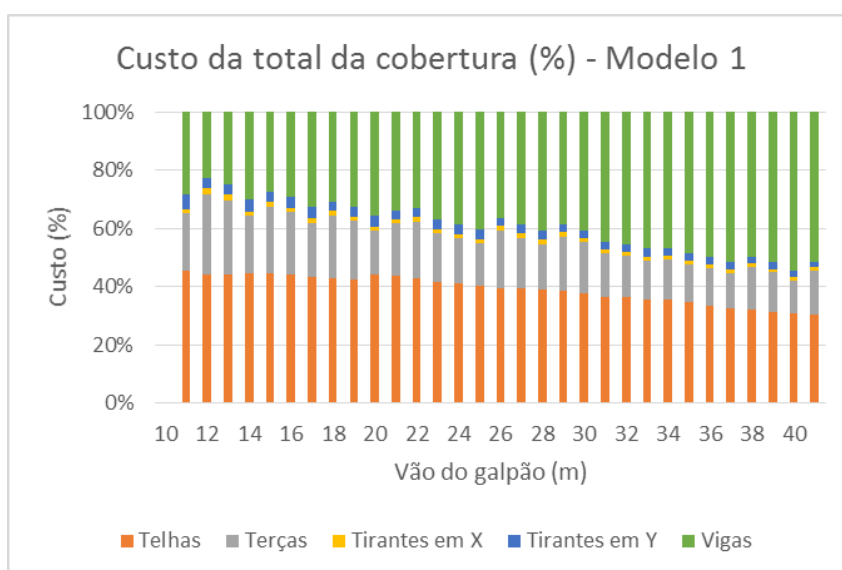


Figura 31 – Custo percentual de cada elemento - Modelo 1

## 7.2 Modelo 2

Por ter um número maior de variáveis de projeto do que o modelo 1, o Modelo 2 foi otimizado com  $it^{max} = 25000$ . As Tabelas 18, 19 e 20 mostram os resultados obtidos após a otimização do custo total da cobertura para diversos vãos.

Como para o modelo 1, foi utilizada, para todos os vãos, o menor perfil de telha disponível. As observações do modelo 1 a respeito do espaçamento entre pórticos, espaçamento entre terças e espessura das telhas são aplicadas também para o modelo 2. No caso das treliças, as telhas possuem custo unitário 40% maior do que os perfis cantoneira.

A relação entre o número de terças e seu respectivo custo é apresentada na Figura 32. Ressalta-se que o uso de uma quantidade menor de terças, consequentemente mais robustas, gera estruturas mais caras. Isso fica claro ao comparar os resultados para os vãos de 29 e 30 metros.

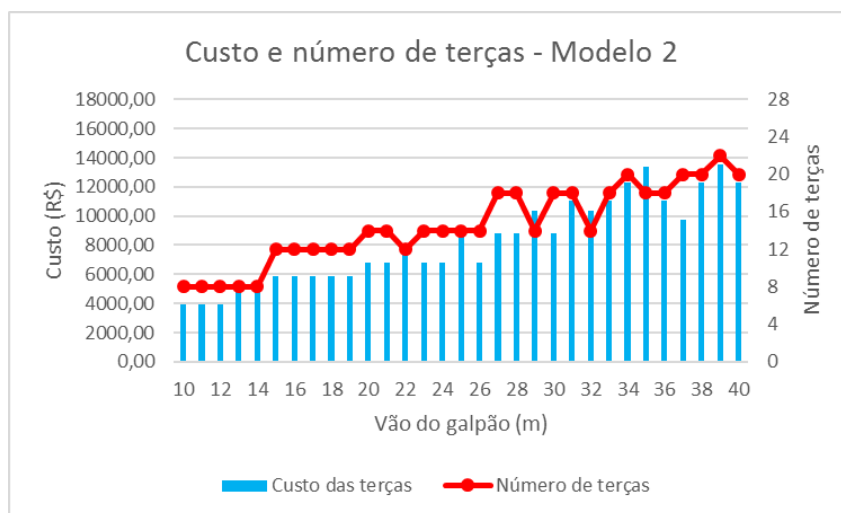


Figura 32 – Número de terças e seu respectivo custo para cada vão - Modelo 2

A inclinação do telhado apresentou certo padrão, variando, de modo geral, entre 9% e 20%. Pode-se afirmar que a utilização da inclinação do telhado nesse intervalo é o mais indicado para projetar galpões com treliças de banzos paralelos.

Durante o dimensionamento percebeu-se a importância dos travamentos do banzo inferior da treliça na otimização do custo do galpão. Observa-se que os travamentos possuem um custo muito baixo se comparado ao custo total da estrutura (em torno de 2% do custo total) dada a reduzida quantidade de aço utilizada nesses elementos.

O espaçamento entre os banzos paralelos podia variar entre 0,3 metros e 0,9 metros. A melhor distância ficou entre 0,3 e 0,65 metros para os vãos considerados. Em geral, para vãos menores, de até 18 metros, pode-se utilizar um valor tanto menor quanto permita as limitações construtivas. Um espaçamento menor, além de gerar economia para as treliças, resulta em consumos de aço menores para os travamentos do banzo inferior. Para os demais

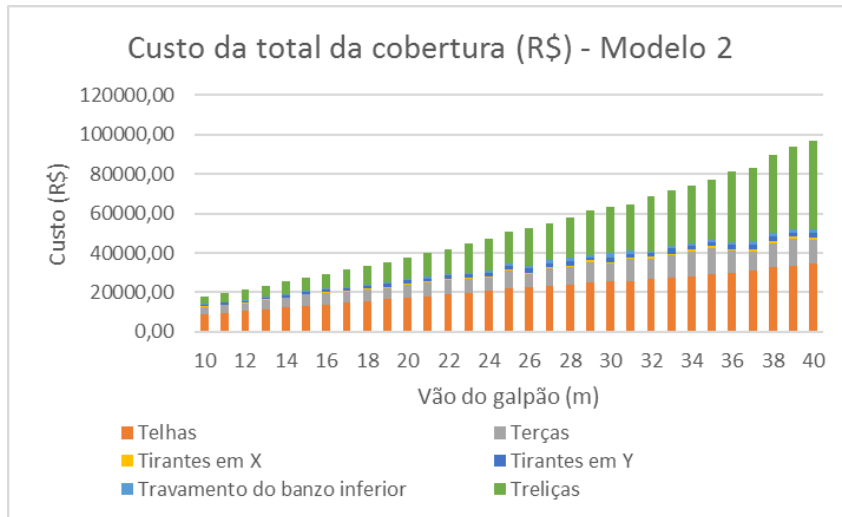


Figura 33 – Custo em reais para cada elemento - Modelo 2

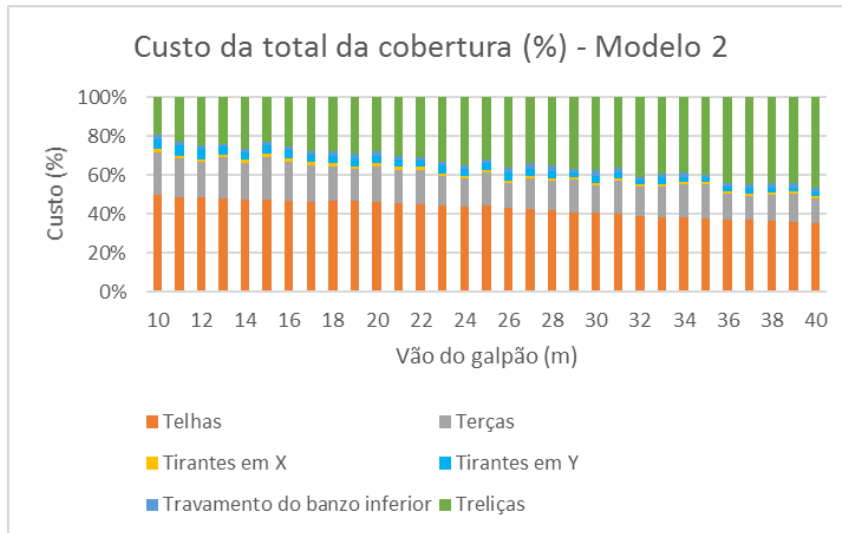


Figura 34 – Custo percentual de cada elemento - Modelo 2

vãos, a tendência é utilizar espaçamentos entre  $\frac{L}{65}$  e  $\frac{L}{45}$  em que  $L$  é a largura ou vão do galpão.

As Figuras 33 e 34 mostram a composição do custo total de acordo com cada elemento para o Modelo 2.

### 7.3 Modelo 3

O modelo 3 foi otimizado com  $it^{max} = 30000$  por ser o modelo com maior número de variáveis de projeto. Os resultados estão expressos nas Tabelas 21, 22 e 23. As barras utilizadas nas diagonais ou montantes são numeradas da esquerda para a direita até o vão central, conforme a Figura 59.

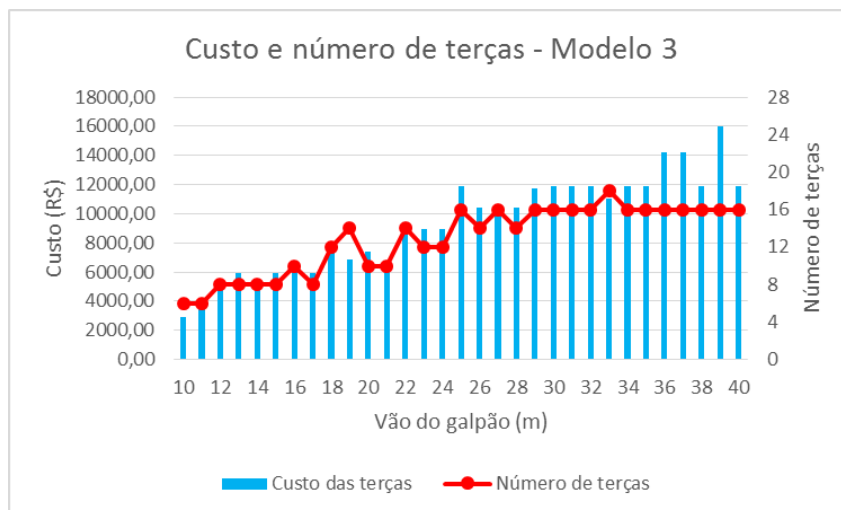


Figura 35 – Número de terças e seu respectivo custo para cada vão - Modelo 3

Para todos os vãos, a melhor escolha para o perfil das telhas é a com a menor espessura disponível, pelos mesmos motivos apresentados para os outros modelos. A relação entre custo e número de terças é mostrada na [Figura 35](#).

Percebe-se que, conforme maior o vão do galpão, maior é a influência dos travamentos do banzo inferior da treliça no custo da cobertura. Todas as mãos-francesas possuem o mesmo perfil cantoneira pois foram dimensionadas para o caso mais crítico, no centro do vão. De modo a manter a inclinação razoavelmente constante ao aumentar o vão do galpão, é natural que a altura na treliça no centro do vão seja cada vez maior. Assim, é necessário cada vez mais um perfil mais robusto para a mão-francesa, resultando no aumento na taxa do custo da cobertura. Para esses casos, pode-se considerar a adoção de outros sistemas de travamento como, por exemplo, através de tirantes que ligam o banzo inferior das treliças ao banzo superior de treliças adjacentes.

A inclinação do telhado ficou, em sua maioria, entre 8% e 12%, os menores valores entre os 3 modelos analisados. Isso, pois maiores inclinações geram custos mais elevados para os travamentos do banzo inferior, o que não é encontrado nos outros modelos. Além disso, inclinações maiores geram maiores consumos de aço para as próprias treliças.

Dos três modelos de topologia que a treliça poderia assumir, o Pratt foi o que apresentou pior desempenho, não figurando nenhuma vez entre o melhor modelo dentre todos os vãos em que a treliça foi dimensionada. Os modelos Warren e Howe se alternaram entre as soluções que geraram o menor custo para a cobertura do galpão, com leve vantagem do modelo Howe.

As Figuras [36](#) e [37](#) mostram a composição do custo total de acordo com cada elemento para o Modelo 3.

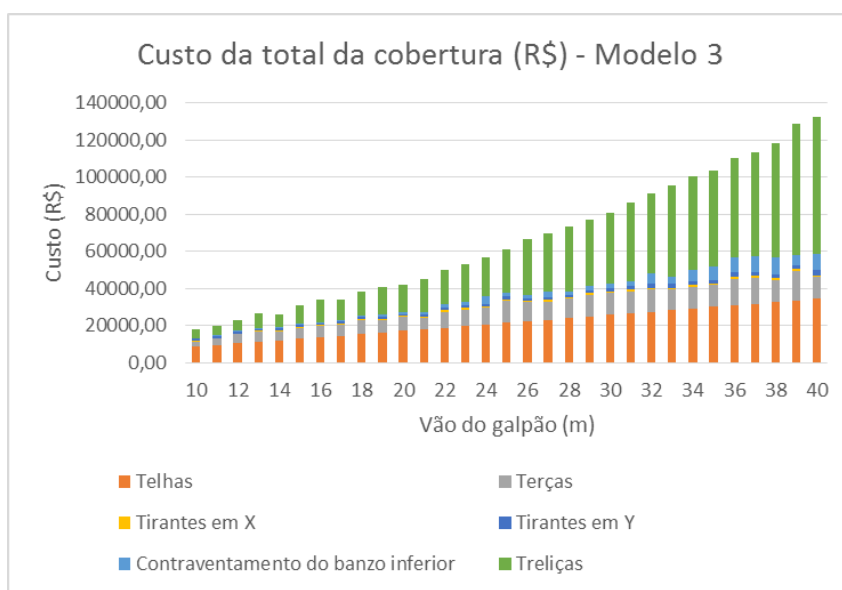


Figura 36 – Custo em reais para cada elemento - Modelo 3

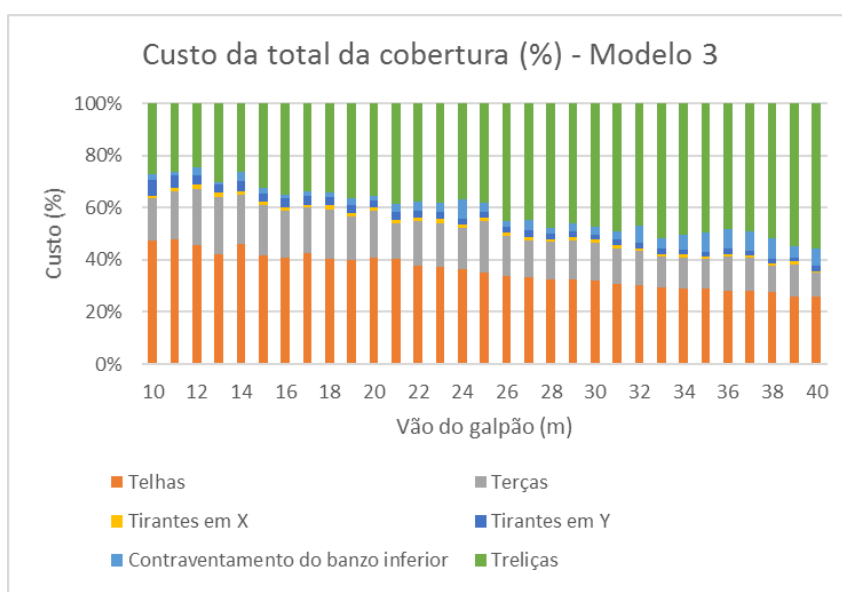


Figura 37 – Custo percentual de cada elemento - Modelo 3

## 7.4 Análise comparativa entre modelos

No processo de otimização, seis perfis de telhas estavam disponíveis para escolha e, no entanto, a telha com menor espessura gerou o melhor resultados em termos de custos para todos os vãos considerados dos três modelos. Isso se deve às telhas terem maior custo unitário em relação aos outros elementos. Por isso, é mais vantajoso utilizar mais terças e um espaçamento entre pórticos menor para que os esforços atuantes sobre a região de influência sobre as telhas seja menor. O menor gasto com as telhas é preferível mesmo com um aumento no custo das terças e pórticos ao reduzir os espaçamentos. Além disso, mesmo para a telha de menor espessura, os espaçamentos máximos entre terças podia ser de até 3 metros. Após a otimização, percebe-se que os espaçamentos foram menores devido à exigência dos carregamentos. Como exemplo, pode-se citar o uso de telhas com 0,95mm de espessura com apoios a cada 2,75 metros, que é aproximadamente equivalente em termos de resistência à telha de 0,43mm de espessura com apoios a cada 2 metros. O uso de telhas de 0,95mm de espessura acaba não sendo vantajoso mesmo com a possibilidade de usar menor número de terças e pórticos. O custo das telhas variam de modo aproximadamente linear de acordo com o vão do galpão, conforme a [Figura 38](#), pois é utilizado sempre o mesmo perfil.

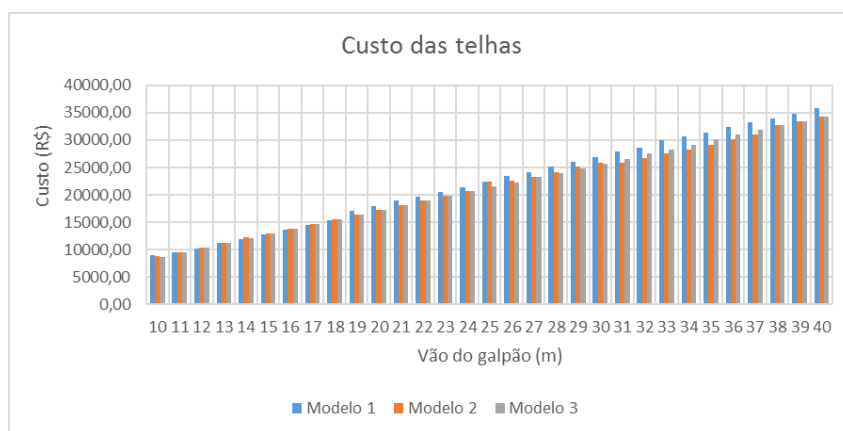


Figura 38 – Custo comparativo das telhas

Travamentos dos banzos inferiores da treliça foram necessários para os modelos 2 e 3. O número de travamentos, em tese, poderia assumir valores de acordo com o número de terças, não precisando, necessariamente, estar fixos em todas elas. No entanto, percebe-se que é mais vantajoso colocar um número maior de travamentos de modo a diminuir o comprimento de flambagem do banzo inferior. O uso de maior número de travamentos mostrou-se mais vantajoso do que a adoção de perfis mais robustos para as treliças. Assim, é recomendável colocar travamentos posicionados em todas as terças.

O sistema de travamento com mãos-francesas apresentou bom desempenho se utilizado em treliças de banzos paralelos. No entanto, para treliças com apenas os banzos

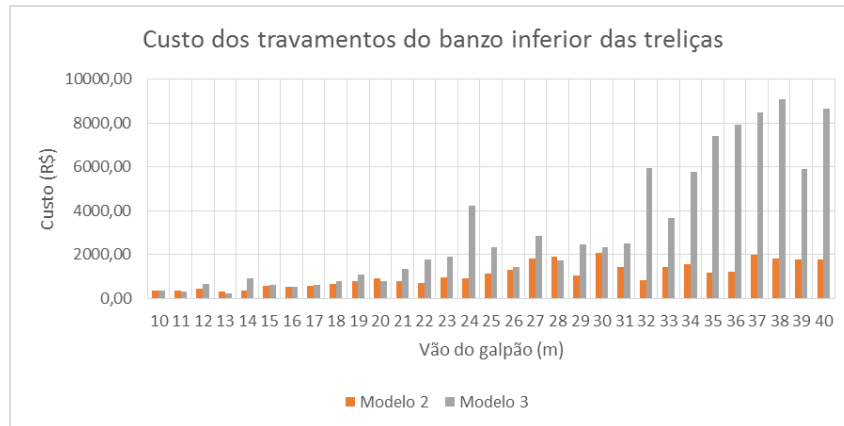


Figura 39 – Custo dos travamentos do banco inferior da treliça

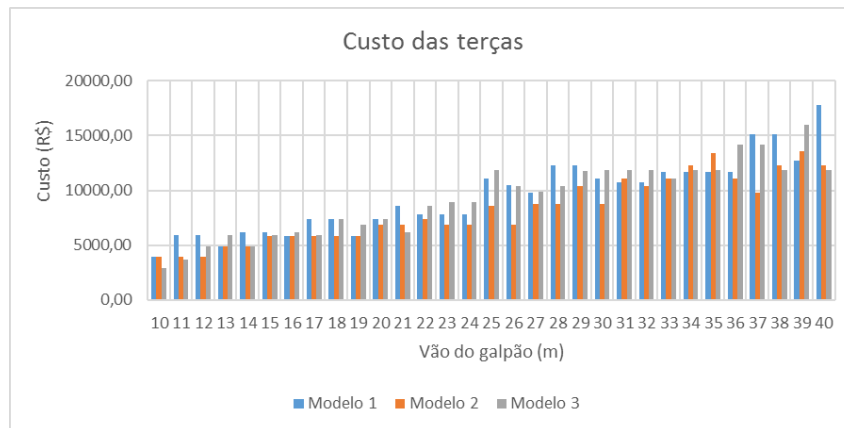


Figura 40 – Custo das terças

superiores inclinados e grandes vãos, é preferível o uso de outros sistemas de travamento. Enquanto para o modelo 2 os travamentos do banco inferior da treliças representaram em torno de 2% do custo total da cobertura, para o modelo 3 esse valor chegou a quase 8%. Uma comparação da parcela de custos dos travamentos é mostrada na [Figura 39](#).

Da mesma forma que os travamentos, as terças não necessariamente precisariam estar posicionadas em todos os nós do banco superior. Ao analisar a [Figura 40](#), percebe-se que o uso de um número maior de terças de menor seção transversal pode ser mais econômico do que colocar menor quantidade de terças de maior seção transversal. Para alguns casos, essa economia pode chegar a 15% do custo das terças.

O custo dos tirantes em X e em Y são dependentes do vão do galpão, do espaçamento entre terças e da inclinação do telhado. Como eles representam uma pequena parcela do custo total da cobertura do galpão, não apresentam um padrão definido, mas se adequam de acordo com as variáveis de projeto que possuem maior impacto no custo da cobertura. Os custos dos tirantes em X e em Y para os três modelos são mostrados nas [Figuras 41](#) e [42](#), respectivamente.

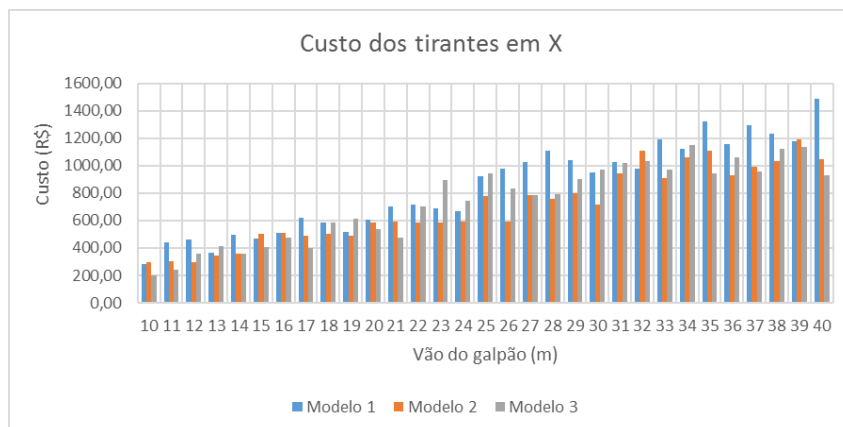


Figura 41 – Custo dos tirantes em X

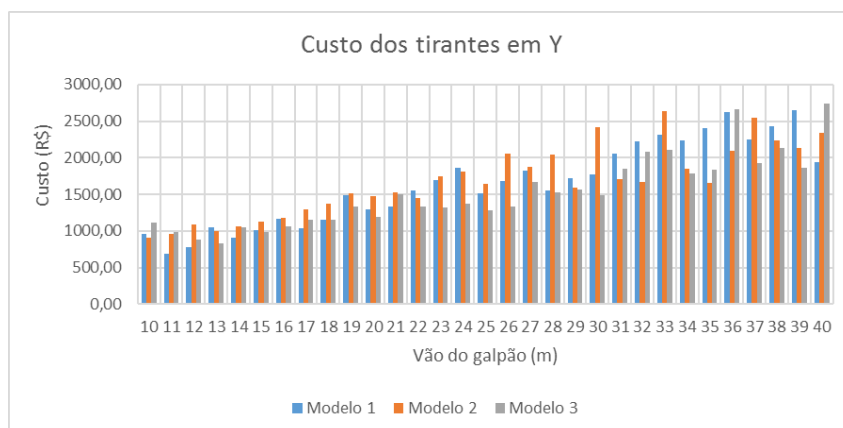


Figura 42 – Custo dos tirantes em Y

O custo do pórticos se refere ao custo das vigas de alma cheia para o Modelo 1 e para o custo das treliças do Modelos 2 e 3 e está representado na [Figura 43](#).

Também fica evidente a diferença entre os três modelos com relação à inclinação do telhado ([Figura 44](#)). Observou-se o Modelo 1 com as maiores inclinações. O emprego de telhados mais inclinados resulta em uma maior quantidade de aço. No entanto, esse aumento de custo é menor do que caso tivesse sido utilizada uma inclinação menor, quando as forças de sucção do vento, com mais intensidade, resultariam em estruturas mais robustas e, conseqüentemente, mais caras. Para o Modelo 2, as inclinações que geram os menores custos foram menores do que para o Modelo 1, provavelmente devido às diferenças entre as resistências das vigas de alma cheia e e elementos usados nas treliças. O Modelo 3 foi o que apresentou as menores inclinações. Isso, devido à grande dependência do custo por parte dos travamentos do banzo inferior da treliça, em que inclinações maiores resultam em mãos-francesas mais caras.

O espaçamento entre pórticos não apresentou diferenças significativas entre os modelos. Para a maior parte dos casos considerados, o espaçamento entre pórticos ficou entre 3 e 4 metros. Pode-se afirmar que o dimensionamento com espaçamento entre pórticos



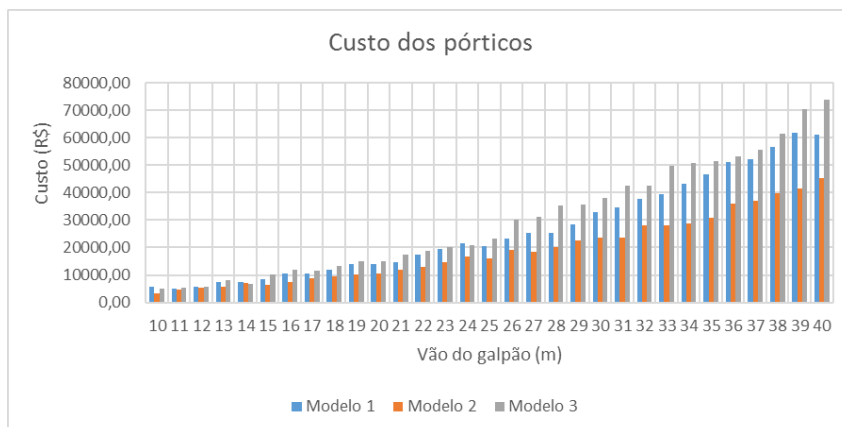


Figura 43 – Custo dos pórticos

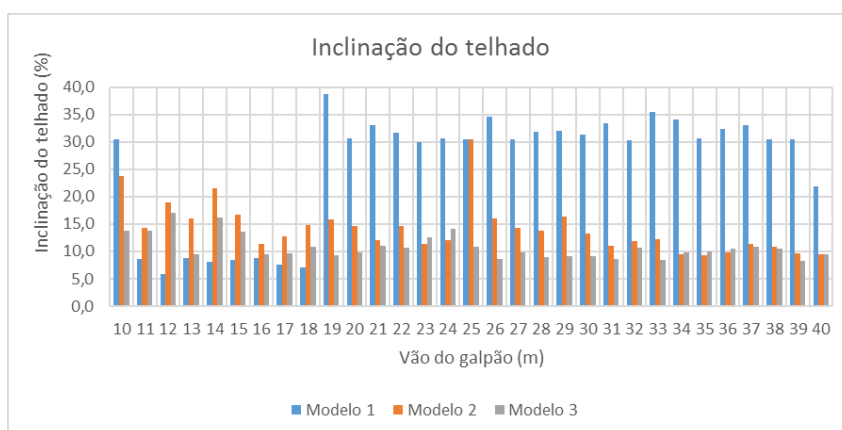


Figura 44 – Inclinação do telhado

nesse intervalo é o mais indicado para construir galpões mais econômicos.

Em relação ao custo global da cobertura do edifício industrial, para todos os vãos considerados, o Modelo 2, formado por treliças com banzos paralelos, apresentou o melhor desempenho, seguido do Modelo 1, formado por vigas de alma cheia, e, por último, o Modelo 3, como pode ser visto na [Figura 46](#).

A eficiência do Modelo 2 se deve, entre outros fatores, às características geométricas e por possuir travamentos nas duas direções do plano da seção transversal das barras, o que resulta em uma baixa quantidade de aço utilizada. Muitas vezes o uso de estruturas adicionais se justifica devido ao menor custo global da estrutura. Por último, a treliça do Modelo 3 apresentou maiores consumos de aço do que a treliça do Modelo 2 devido a suas características geométricas, além de necessitar de perfis mais robustos para as mãos-francesas devido ao comprimento dos travamentos. Para grandes vãos, o sistema de mãos-francesas para o Modelo 3 não se mostrou eficiente, contribuindo com elevado percentual de custo para o modelo.

Através das Figuras [31](#), [34](#) e [37](#) pode-se perceber que, conforme aumenta o vão do

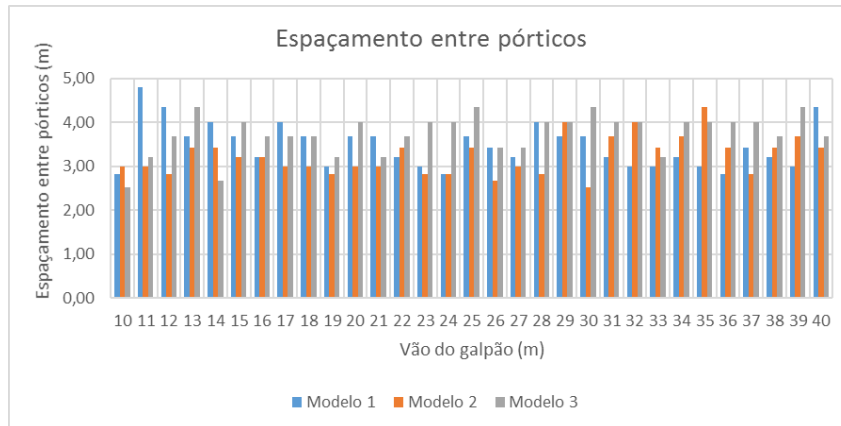


Figura 45 – Espaçamento entre pórticos para cada modelo

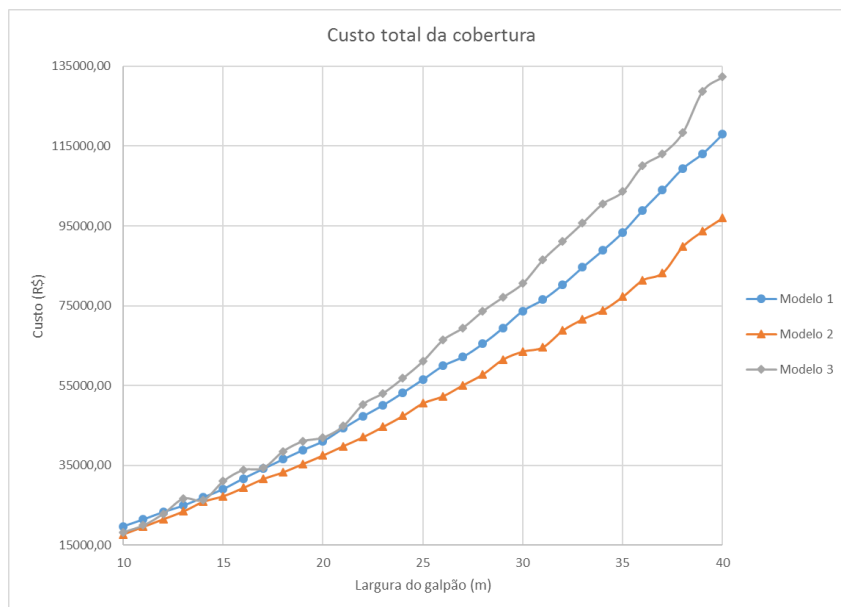


Figura 46 – Comparação do custo da cobertura entre modelos

galpão, o percentual de custo das vigas e treliças aumenta, enquanto diminui a contribuição das telhas e terças no custo. Para os tirantes, o percentual não apresenta grandes variações. Enquanto para o Modelo 2 os travamentos do banzo inferior da treliça contribuem com uma parcela bem pequena de custo, para o Modelo 3 esse percentual aumenta à medida que o vão se torna maior. Esse é mais um indicativo de que o sistema de travamentos com mãos-francesas não é adequado para grandes vãos.

A otimização dos três modelos simultaneamente, para cada vão, levou cerca de 6h rodando os algoritmos em um computador com processador Intel<sup>®</sup> Core<sup>™</sup>i7-4510u 2.00 GHz, com 8GB de memória RAM. Ressalta-se que o dimensionamento convencional levaria mais tempo e não abordaria as considerações de otimização.

## 7.5 Estudos adicionais

### 7.5.1 Massa da cobertura como função objetivo e influência no custo da cobertura

Nesta seção, fez-se um estudo comparativo quando se considera a massa da cobertura como função objetivo e quando se considera o custo da cobertura como função objetivo. Para os três modelos, os resultados estão expressos na [Tabela 7](#).

Através das Figuras [47](#) e [48](#), percebe-se que a otimização da massa resultou exatamente no menor custo, tal como para a otimização do próprio custo. No entanto, quando há grande diferença entre os custos unitários dos elementos que constituem a cobertura de um edifício industrial, há margem para gerar diferenças entre os dois tipos de otimização.

Tabela 7 – Comparação entre a otimização da massa e do custo para os modelos

	Modelo 1 - Otimização da massa	Modelo 1 - Otimização do custo	Modelo 2 - Otimização da massa	Modelo 2 - Otimização do custo	Modelo 3 - Otimização da massa	Modelo 3 - Otimização do custo
Largura do galpão (m)	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
Massa total das telhas (kg)	3992,31	3992,31	3856,97	3856,97	3834,79	3834,79
Massa total das terças (kg)	2079,70	2079,70	1925,23	1925,23	2091,00	2091,00
Massa total dos tirantes em X (kg)	150,62	150,62	146,60	146,60	134,17	134,17
Massa total dos tirantes em Y (kg)	322,11	322,11	367,37	367,37	297,37	297,37
Massa total das mãos-francesas (kg)	-	-	281,49	281,49	242,28	242,28
Massa total das vigas (kg)	4462,63	4462,63	-	-	-	-
Massa total das treliças (kg)	-	-	3248,19	3248,19	4636,68	4636,68
Massa total da cobertura (kg)	11007,37	11007,37	9825,85	9825,85	11236,29	11236,29
Custo total das telhas (R\$)	17885,57	17885,57	17279,25	17279,25	17179,89	17179,89
Custo total das terças (R\$)	7382,95	7382,95	6834,58	6834,58	7423,08	7423,08
Custo total dos tirantes em X (R\$)	603,99	603,99	587,86	587,86	538,04	538,04
Custo total dos tirantes em Y (R\$)	1291,68	1291,68	1473,16	1473,16	1192,46	1192,46
Custo total das mãos-francesas (R\$)	-	-	900,77	900,77	775,30	775,30
Custo total das vigas (R\$)	13878,80	13878,80	-	-	-	-
Custo total das treliças (R\$)	-	-	10394,22	10394,22	14837,40	14837,40
Custo total da cobertura (R\$)	41042,99	41042,99	37469,87	37469,87	41946,19	41946,19

### 7.5.2 Influência do espaçamento entre pórticos como variável de projeto

Outro estudo feito foi a influência da consideração do espaçamento entre pórticos como variável de projeto. Para tanto, foi realizada otimização do custo da cobertura para

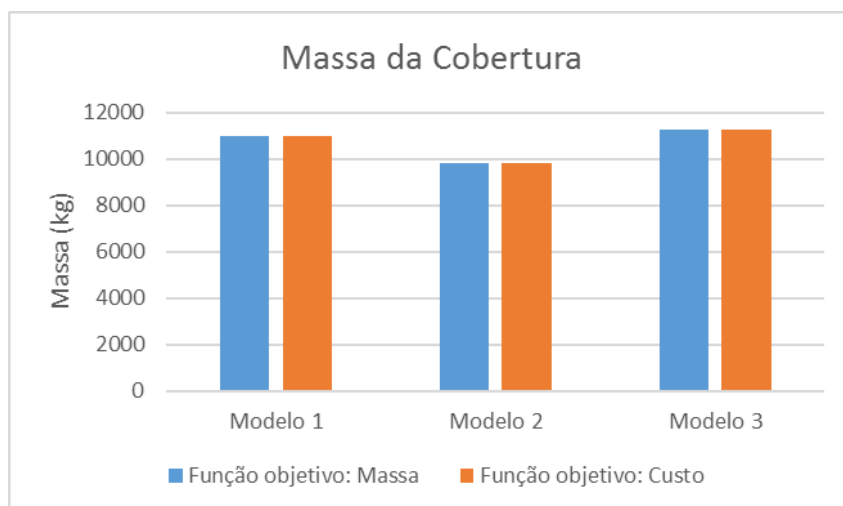


Figura 47 – Massa da cobertura para otimização da massa e do custo para os modelos

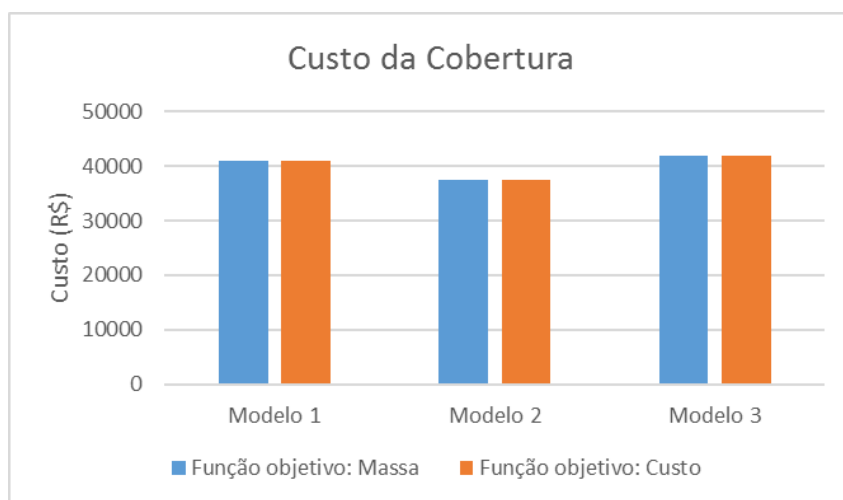


Figura 48 – Custo da cobertura para otimização da massa e do custo para os modelos

os três modelos considerando espaçamento entre pórticos com valor variável e considerando espaçamento constante e igual a 6 metros. Os resultados são mostrados na [Tabela 8](#) e a comparação das massas e custos da cobertura é mostrada nas Figuras [49](#) e [50](#), respectivamente.

Tabela 8 – Comparação entre o espaçamento entre pórticos constante e variável para os modelos

	Modelo 1 - Espaçamento entre pórticos constante	Modelo 1 - Espaçamento entre pórticos variável	Modelo 2 - Espaçamento entre pórticos constante	Modelo 2 - Espaçamento entre pórticos variável	Modelo 3 - Espaçamento entre pórticos constante	Modelo 3 - Espaçamento entre pórticos variável
Largura do galpão (m)	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
Espaçamento entre pórticos	6,00	3,69	6,00	3,00	6,00	4,00
Massa total das telhas (kg)	3827,52	3992,31	3850,62	3856,97	3842,99	3834,79
Massa total das terças (kg)	4615,29	2079,70	4615,29	1925,23	4896,35	2091,00
Massa total dos tirantes em X (kg)	265,40	482,23	265,51	146,60	224,73	134,17
Massa total dos tirantes em Y (kg)	216,25	322,11	217,11	367,37	217,05	297,37
Massa total das mãos-francesas (kg)	-	-	130,84	281,49	283,97	242,28
Massa total das vigas (kg)	4349,93	4462,63	-	-	-	-
Massa total das treliças (kg)	-	-	3204,27	3248,19	4349,40	4636,68
Massa total da cobertura (kg)	13274,39	11338,98	12283,64	9825,85	13814,49	11236,29
Custo total das telhas (R\$)	17147,28	17885,57	17250,80	17279,25	17216,60	17179,89
Custo total das terças (R\$)	16384,28	7382,95	16384,28	6834,58	17382,05	7423,08
Custo total dos tirantes em X (R\$)	1064,24	603,99	1064,70	587,86	901,17	538,04
Custo total dos tirantes em Y (R\$)	867,19	1291,68	870,63	1473,16	870,40	1192,46
Custo total das mãos-francesas (R\$)	-	-	418,69	900,77	908,71	775,30
Custo total das vigas (R\$)	13528,31	13878,80	-	-	-	-
Custo total das treliças (R\$)	-	-	10253,66	10394,22	13918,10	14837,40
Custo total da cobertura (R\$)	48991,32	41042,99	46242,79	37469,87	51197,05	41946,19

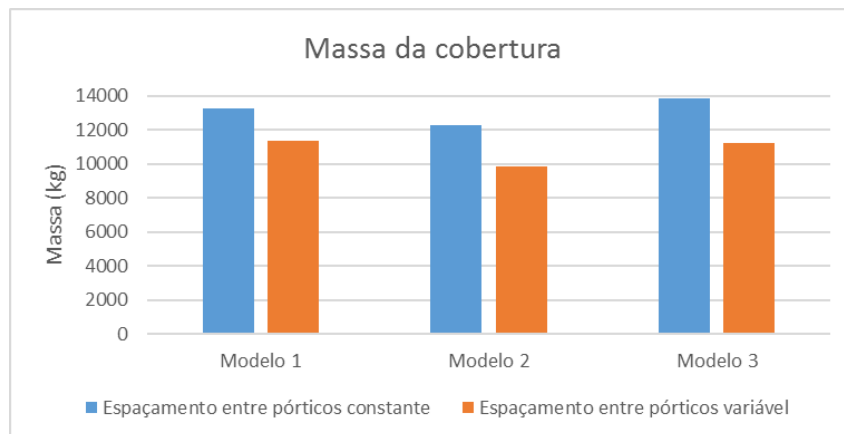


Figura 49 – Massa da cobertura para espaçamento entre pórticos constante e variável para os modelos

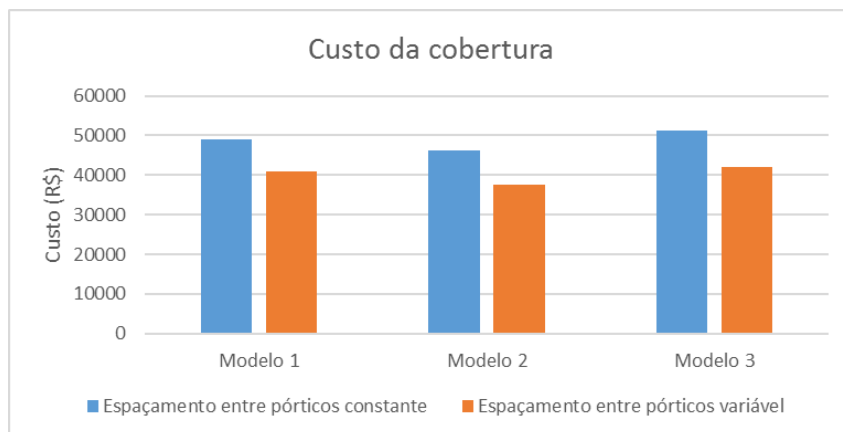


Figura 50 – Custo da cobertura para espaçamento entre pórticos constante e variável para os modelos

Percebe-se que nos casos em que o espaçamento entre pórticos foi considerado como variável, a massa e custo da cobertura foram menores. Inclusive, mesmo com a massa das vigas ou treliças para os Modelos 1 e 3 tendo resultado em valor menor quando se considera espaçamento entre pórticos constante, o custo global da cobertura para esses casos foi bem mais elevado do que para a consideração do espaçamento entre pórticos variável. Para o Modelo 1, a liberdade de escolha do espaçamento entre pórticos resultou em custo 16,3% menor, enquanto para os Modelos 2 e 3 esse valor foi de 12,9% e 18,1%, respectivamente. Assim, fica evidente a importância da consideração do espaçamento entre pórticos como variável de projeto.

## 8 Conclusão

Este trabalho apresenta a otimização do custo de três sistemas estruturais utilizados na cobertura de edifícios industriais. Durante o processo, é abordada a otimização dimensional, geométrica e topológica da estrutura. Para tanto, foi utilizado o algoritmo genético *Seach Group Algorithm (SGA)* e o dimensionamento seguiu as exigências da [ABNT NBR 6123 \(1988\)](#) - Forças devidas ao vento em edificações e [ABNT NBR 8800 \(2008\)](#) – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios.

Com base nos resultados, o modelo 2, constituído por treliças com banzos paralelos, apresentou o menor custo da cobertura para todos os vãos considerados, seguido do modelo 1, composto por vigas de seção I, e, por último, o modelo 3, com treliças de banzos superiores inclinados.

Caso o custo das telhas seja muito superior ao custo dos outros componentes do galpão, é mais vantajoso o uso do menor perfil disponível a fim de reduzir os custos com esses elementos.

No caso do modelo 3 para grandes vãos, o uso de mãos-francesas como sistema de travamento do banzo inferior das treliças mostrou-se ineficiente pois necessitou de perfis muito robustos, resultando em elevados custos para a cobertura. Assim, deve-se considerar outros sistemas de contraventamento para essas condições.

Para vigas de alma cheia, travamentos na direção perpendicular à alma podem ser dispensados quando o preço de diferentes bitolas de mesma área transversal é o mesmo. Quando isso não é possível, deve-se considerar a inserção de travamentos para diminuir o comprimento de flambagem nessa direção.

Embora possam assumir diferentes configurações, a colocação dos travamentos do banzo inferior das treliças em todas as terças gera a estrutura com menor custo.

À medida que aumenta o vão livre do galpão, maior é o percentual de participação no custo por parte dos pórticos, em relação aos outros elementos, assim como torna-se mais evidente a vantagem do modelo 2 em relação aos outros modelos.

Entre as topologias avaliadas para as treliças com banzos inclinados, os modelos de treliça Howe e Warren apresentaram melhores resultados. O modelo de treliça Pratt mostrou o pior desempenho, não figurando nenhuma vez como a melhor topologia a ser usada entre os 30 metros de vão livre em que houve dimensionamento e otimização.

A otimização da massa da cobertura resultou, da mesma forma que para o custo como função objetivo, na estrutura com menor custo. Entretanto, quando há grande diferença de preço entre os perfis utilizados para diferentes elementos e diversas combinações

de variáveis de projeto são possíveis, diferenças de custo podem ser encontradas.

O espaçamento entre pórticos mostrou-se como uma das variáveis de maior impacto na otimização do galpão. Provou-se que a desconsideração desse fator pode gerar grandes custos adicionais para a estrutura. É recomendável o uso de espaçamentos entre pórticos variando de 3 a 4 metros.

Embora a otimização de estrutura seja um grande avanço na redução de custos em comparação ao dimensionamento convencional, verifica-se que ainda existem muitas incertezas ao projetar estruturas. Caso fosse possível definir precisamente o funcionamento das mesmas, a otimização seria feita com muito mais eficiência.



## 9 Trabalhos Futuros

Como sugestão para trabalhos futuros, é sugerido:

- (i) Fazer a análise estrutural espacial do edifício industrial;
- (ii) Realizar a análise de custos do edifício industrial com vigas pré-moldadas de concreto e comparar com as estruturas em aço;
- (iii) Implementar outras topologias para os modelos de sustentação treliçados;
- (iv) Dimensionar e otimizar a estrutura do edifício industrial considerando os pilares, tapamentos laterais e fundações, não apenas a cobertura;
- (v) Avaliar outras formas de fazer o travamento do banzo inferior das treliças;
- (vi) Incluir perfis formados à frio;
- (vii) Incluir o custo de mão-de-obra e elementos de ligação, como porcas, parafusos e soldas.



# Referências

ADELI, H.; SARMA, K. C. *Cost Optimization of Structures: Fuzzy Logic, Genetic Algorithms, and Parallel Computing*. [S.l.]: John Wiley and Sons Inc., 2009. Citado na página 21.

ARORA, J. S. *Introduction to optimum design*. San Diego, USA: Elsevier Academic Press, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 20, 21 e 31.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA CONSTRUÇÃO METÁLICA. *Manual Técnico: Telhas de Aço*. 1ª edição. ed. São Paulo, 2009. 36 p. Citado 2 vezes nas páginas 118 e 119.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6123 : Forças devidas ao vento em edificações*. Rio de Janeiro, 1988. 66 p. Citado 7 vezes nas páginas 7, 9, 23, 24, 49, 50 e 85.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 8681: Ações e segurança nas estruturas - Procedimento*. Rio de Janeiro, 2003. 16 p. Citado na página 49.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 14514: Telhas de aço revestido de seção trapezoidal — Requisitos*. Rio de Janeiro, 2008. 8 p. Citado na página 43.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 8800 : Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios*. Rio de Janeiro, 2008. 247p. Citado 23 vezes nas páginas 7, 9, 23, 24, 40, 42, 43, 44, 46, 47, 49, 51, 52, 61, 85, 97, 98, 99, 100, 107, 109, 110 e 111.

BELLEI, I. H. *Edifícios Industriais em Aço*. São Paulo: 5ª Edição, 2004. Citado 3 vezes nas páginas 19, 25 e 41.

CARNASCIALI, C. C. *Estruturas metálicas na prática*. São Paulo: 5ª Edição, 1978. Citado 3 vezes nas páginas 19, 25 e 40.

CASTRO, R. E. *Otimização de Estruturas com Multi-Objetivos Via Algoritmos Genéticos de Pareto*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ, 2001. Citado na página 22.

CENTRO BRASILEIRO DA CONSTRUÇÃO EM AÇO. *Volume I – Galpões para Usos Gerais: Bibliografia técnica para o desenvolvimento da construção metálica*. Rio de Janeiro, 2003. 75 p. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 43.

CENTRO BRASILEIRO DA CONSTRUÇÃO EM AÇO. *Galpões para Usos Gerais: Manual de construção em aço*. Rio de Janeiro, 2010. 75 p. Citado 7 vezes nas páginas 19, 26, 27, 44, 45, 50 e 53.

CHAVES, M. R. *Avaliação do desempenho de soluções estruturais para galpões leves*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil, Ouro Preto, 2008. 125 f. Citado na página 30.

- CHENG, G. D. *Introduction to Structural Optimization: Theory, Methods and Solution*. 1992. Lecture Notes, Dalian University of Technology. Citado na página 28.
- COUTINHO, K. D. *Método de Otimização Topológica em Estruturas Tridimensionais*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Natal - RN, 2006. 95 p. Citado na página 28.
- DEB, K.; GULATI, S. Design of truss-structures for minimum weight using genetic algorithms. *Finite Elements in Analysis and Design*, v. 37, p. 447–465, 2016. Citado na página 21.
- DOMINGUEZ, A.; STIHARU, I.; SEDAGHATI, R. Practical design optimization of truss structures using the genetic algorithms. *Research in Engineering Design*, v. 17, p. 73–84, 2006. Citado na página 21.
- FLÔR, M. I. *Otimização de Coberturas em Aço de Edifícios Industriais*. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) — Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis, 2015. Citado 5 vezes nas páginas 20, 29, 38, 50 e 51.
- GALANTE, M. Optimum design of trusses with discrete sizing and shape variables. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, v. 39, p. 361–382, 1996. Citado na página 21.
- GENNERT, M. A.; YUILLE, A. L. Determining the optimal weights in multiple objective function optimization. *Second international conference on computer vision, Institute of Electrical and Electronics Engineers*, p. 87–89, 1988. Citado na página 21.
- GOLDBERG, D. E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Reading, Massachusetts: [s.n.], 1989. Citado na página 22.
- GONÇALVES, M. S.; LOPEZ, R. H.; MIGUEL, L. F. F. Search group algorithm: A new metaheuristic method for the optimization of truss structures. *Computers and Structures*, v. 153, p. p. 165–184, 2015. Citado 4 vezes nas páginas 22, 34, 35 e 36.
- GRIERSON, D. E.; PAK, W. H. Optimal sizing, geometrical and topological design using a genetic algorithm. *Structural Optimization*, v. 6, p. 151–159, 1993. Citado na página 21.
- IYENGAR, N.; S.K, G. *Steel Structures: Design and Behavior*. [S.l.]: Edward Arnold Publishers Ltda., 1980. Citado na página 22.
- JENDO, S.; PACZKOWSKI, W. M. Multicriteria discrete optimization of large scale truss systems. *Structural optimization*, v. 6, p. 238–249, 1993. Citado na página 29.
- KELESOGLU, O. Fuzzy multiobjective optimization of truss-structures using genetic algorithm. *Advances in Engineering Software*, v. 38, p. 717–721, 2007. Citado na página 20.
- KRAVANJA, S. et al. Optimal design of single-story steel building structures based on parametric MINLP optimization. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 81, p. 86–103, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 28.
- KRAVANJA, S.; ŽULA, T. Cost optimization of industrial steel building structures. *Advances in Engineering Software*, v. 3, p. 442–450, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 29.

- KUMAR, R. Cost optimization of industrial building using genetic algorithm. *International Journal of Scientific Engineering and Technology*, v. 2, p. 185–191, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 29.
- LEE, B. S.; KNAPTON, J. Optimum cost design of a steel framed building. *Engineering Optimization*, v. 1, n. 3, p. 139–153, 1974. Citado na página 28.
- LOPEZ, R. H. et al. An approach for the global reliability based design optimization of truss structures. *Uncertainties 2014 - Proceedings of the 2nd International Symposium on Uncertainty Quantification and Stochastic Modeling*, p. 12, 2014. Citado na página 20.
- MACHADO, E. S. *Otimização de projeto estrutural com utilização de elementos metálicos e cobertura autoportante*. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) — Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grando do Sul - UNIJUÍ, Ijuí, 2007. Citado na página 29.
- MARTHA, L. F. *Análise de Estruturas - Conceitos e Métodos Básicos*. Rio de Janeiro: Editora Elsevier, 2010. Citado na página 54.
- MAU, S. T. *Introdução à Análise Estrutural - Métodos dos Deslocamentos e das Forças*. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna Ltda, 2015. Citado na página 54.
- MAXWELL, J. C. On reciprocal figures frames and diagrams of forces. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, v. 26/1, p. 589–597, 1869. Citado na página 28.
- MICHELL, A. G. M. The limits of economy of material in framed structures. *Philosophical Magazine*, v. 8, p. 589–597, 1904. Citado na página 28.
- MIGUEL, L. F. F.; LOPEZ, R. H.; MIGUEL, L. F. Multimodal size, shape, and topology optimisation of truss structures using the firefly algorithm. *Advances in Engineering Software*, v. 56, p. 23–37, 2013. Citado na página 22.
- NETO, A. C. Estruturas metálicas II: Notas de aula. Pontífice Universidade Católica. 2007. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.
- PEREIRA, J. P. G. *Heurísticas computacionais aplicadas à otimização estrutural de treliças bidimensionais*. Dissertação (Mestrado) — Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Uberlândia, 2007. 120 f. Citado na página 22.
- PERFIS GERDAU AÇOMINAS. *Coletânea do Uso do Aço: galpões em pórticos com perfis estruturais laminados*. 3ª edição. ed. São Paulo, 2005. v. 3, 68 p. Citado na página 19.
- PERFIS GERDAU AÇOMINAS. *Catálogo de bolso GI: Barras e perfis – laminas 1 e 2*. São Paulo, 2011. 16 p. Citado na página 113.
- PERFIS GERDAU AÇOMINAS. *Catálogo de Produtos*. [S.l.], 2016. Citado 5 vezes nas páginas 114, 115, 116, 117 e 118.
- PFEIL, W.; PFEIL, M. *Estruturas de Aço: Dimensionamento Prático*. 8ª edição. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009. Citado na página 25.
- PINHEIRO, A. C. da F. B. *Estruturas Metálicas: Cálculos, detalhes, exercícios e projetos*. São Paulo: 2ª Edição, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 101.

- QIAO, S.; ZHOU, K. Structural topology optimization under uncertain load based on truss-like material model. *Engineering Mechanics*, v. 33, p. 252–256, 2016. Citado na página 21.
- QUEIROZ, P. C. de O. *Análise estática e dinâmica de estruturas reticuladas: ambiente de simulação em JAVA*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal da Paraíba, Programa de Pós Graduação de Engenharia Mecânica, João Pessoa, 2010. 235 p. Citado 2 vezes nas páginas 54 e 55.
- RAJAN, S. D. Sizing, shape, and topology design optimization of trusses using genetic algorithm. *Journal of Structural Engineering*, v. 121, n. 10, p. 1480–1487, 1995. Citado na página 20.
- RAJEEV, S.; KRISHNAMOORTHY, C. S. Discrete optimization of structures using genetic algorithms. *Journal of Structural Engineering*, v. 118, n. 5, p. 1233–1250, 1992. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.
- RUSSELL, A. D.; CHOUDHARY, K. T. Cost optimization of buildings. *American Society of Civil Engineers, Journal of the Structural Division*, v. 106, p. 283–300, 1980. Citado na página 29.
- SAKA, M. Optimum design of pitched roof steel frames with haunched rafters by genetic algorithm. *Computers and Structures*, v. 81, n. 18-19, p. 1967–1978, 2003. Citado 3 vezes nas páginas 21, 22 e 28.
- SALAJEGHEH, E.; VANDERPLAATS, G. N. Optimum design of trusses with discrete sizing and shape variables. *Structural Optimization*, v. 6, p. 79–85, 1993. Citado na página 21.
- SALMON, C. G.; JOHNSON, J. E.; MALHAS, F. A. *Steel Structures: Design and Behavior*. [S.l.]: 5ª Edição, 2004. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 27.
- SMITH, J. C. *Structural steel design: LRFD approach*. [S.l.]: 2nd ed., 1996. Citado na página 27.
- SONMEZ, M. Discrete optimum design of truss structures using artificial bee colony algorithm. *Struct Multidisc Optim*, v. 43, p. 85–97, 2011. Citado na página 20.
- SORIANO, H. L. *Análise de estruturas: formulação matricial e implementação computacional*. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna Ltda, 2005. Citado na página 54.
- SOUZA, R. R. de. *Metodologia Para Otimização topológica, Dimensional e Geométrica de Estruturas de Torres de Linhas de Transmissão*. 61 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) — Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis, 2014. Citado na página 66.
- TANG, W.; TONG, L.; GU, Y. Improved genetic algorithm for design optimization of truss structures with sizing, shape and topology variables. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, v. 62, p. 1737–1762, 2005. Citado na página 21.
- TIAINEN, T. et al. Steel building optimization applying metamodel techniques. *Journal of Structural Mechanics*, v. 45, p. 152 – 161, 2012. Citado na página 29.

TISOT, G. D. D.; MEDEIROS, G. F. de; KRIPKA, M. Estudo de treliças metálicas para coberturas em duas águas através de otimização topológica. *Congresso Latino Americano da Construção Metálica*, 2010. Citado na página 66.

TORII, A. J.; LOPEZ, R. H.; BIONDINI, F. An approach to reliability-based shape and topology optimization of truss structures. *Engineering Optimization*, v. 44, p. 37–53, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 22.

VAINIO, T.; NIPPALA, E. Why do costs of civil engineering grow faster than prices in general? *Proceedings of the 19th CIB World Building Congress, Brisbane 2013: Construction and Society*, p. 141–152, 2013. Citado na página 19.

WU, S.-J.; CHOW, P.-T. Steady-state genetic algorithms for discrete optimization of trusses. *Computers and Structures*, v. 56, n. 6, p. 979–991, 1995. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.

YANG, Y.; SOH, C. K. Automated optimum design of structures using genetic programming. *Computers and Structures*, v. 80, p. 1537–1546, 2002. Citado na página 22.

ŽULA, T.; KRAVANJA, Z.; KRAVANJA, S. MINLP optimization of a single-storey industrial steel building. *Advances in Engineering Software*, v. 10, p. 707–724, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 28.





## Apêndices



# APÊNDICE A – Considerações normativas para o dimensionamento de vigas de alma cheia, treliças e tirantes

## A.1 Vigas de alma cheia

### A.1.1 Força axial de compressão resistente de cálculo – $N_{c,Rd}$

De acordo com a [ABNT NBR 8800 \(2008\)](#), a força axial de compressão resistente de cálculo,  $N_{c,Rd}$ , associada aos estados limites últimos de instabilidade por flexão, por torção ou flexo-torção e de flambagem local, deve ser determinada pela expressão:

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi Q A_g f_y}{\gamma_{a1}} \quad (\text{A.1})$$

onde:

$\chi$  o fator de redução associado à resistência à compressão;

$Q$  é o fator de redução total associado à flambagem local;

$A_g$  é a área bruta da seção transversal da barra;

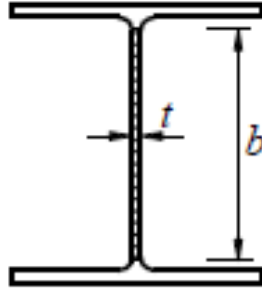
#### A.1.1.1 Fator de redução $Q$

Segundo a [ABNT NBR 8800 \(2008\)](#), os elementos que fazem parte da seção transversal de perfis I, para efeito de flambagem local, são classificados em AA e AL, relativos à alma e as mesas, respectivamente. Cada elemento deve ser verificado quanto à sua esbeltez, de modo que se o elemento for considerado esbelto, deve-se atribuir um fator de redução  $Q$  a fim de diminuir o valor da força axial resistente de cálculo devido à possibilidade de ocorrência de flambagem local. Para que não haja redução da capacidade resistente quanto à força axial, ocasionada por flambagem local, a relação entre largura espessura do elemento não deve ultrapassar o valor limite, de acordo com cada componente da seção transversal. Assim,  $Q$  é definido como:

$$Q = 1,00, \text{ para } \frac{b}{t} \leq \left(\frac{b}{t}\right)_{lim} \quad (\text{A.2})$$

$$Q = Q_a Q_s, \text{ para } \frac{b}{t} > \left(\frac{b}{t}\right)_{lim} \quad (\text{A.3})$$

Figura 51 – Largura e espessura da alma do perfil I.



Fonte: [ABNT NBR 8800 \(2008\)](#)

onde:

$b$  é a altura efetiva da alma ou metade da largura da mesa;

$t$  é a espessura da alma ou da mesa;

$Q_a$  e  $Q_s$  são fatores de redução que levam em conta a flambagem local da alma e da mesa, respectivamente, definidos na [subseção A.1.1.1.1](#) e [subseção A.1.1.1.2](#).

#### A.1.1.1.1 Elemento AA

O elemento AA é relativo à alma do perfil I. A relação entre largura e espessura limite é dada por:

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{lim} = 1,40\sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (A.4)$$

onde:

$b$  é a altura efetiva da alma ([Figura 51](#));

$t$  é a espessura da alma ([Figura 51](#));

$E$  é o módulo de elasticidade do aço;

$f_y$  é a resistência de escoamento do aço;

O fator de redução relativo à flambagem local da alma é dado por:

$$Q_a = \frac{A_{ef}}{A_g} \quad (A.5)$$

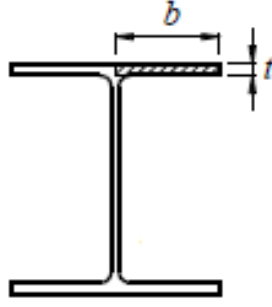
onde:

$A_g$  é a área bruta da seção transversal do perfil ([Apêndice B](#));

$A_{ef}$  é a área efetiva da seção transversal, dada por:

$$A_{ef} = A_g - (b - b_{ef})t \quad (A.6)$$

Figura 52 – Largura e espessura da mesa do perfil I.



Fonte: Adaptado (ABNT NBR 8800, 2008)

para:

$$b_{ef} = 1,92t \sqrt{\frac{E}{\sigma} \left[ 1 - \frac{0,34}{b/t} \right]} \leq b \quad (\text{A.7})$$

onde:

$\sigma$  é a tensão que pode atuar no elemento analisado, inicialmente tomado igual a:

$$\sigma = \chi f_y \quad (\text{A.8})$$

#### A.1.1.1.2 Elemento AL

O elemento AL é relativo à mesa do perfil I. A relação entre largura e espessura limite é dada por:

$$\left( \frac{b}{t} \right)_{lim} = 0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (\text{A.9})$$

onde:

$b$  é a metade da largura da mesa (Figura 52);

$t$  é a espessura da mesa (Figura 52).

O fator de redução relativo à flambagem local da mesa é dado:

$$Q_s = 1,415 - 0,74 \frac{b}{t} \sqrt{\frac{f_y}{E}}, \text{ para } 0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y}} < \frac{b}{t} \leq 1,03 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (\text{A.10})$$

$$Q_s = \frac{0,69E}{f_y \left( \frac{b}{t} \right)^2}, \text{ para } \frac{b}{t} > 1,03 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (\text{A.11})$$

#### A.1.1.2 Fator de redução $\chi$

O fator de redução associado à resistência à compressão,  $\chi$ , é dado por:

$$\left. \begin{aligned} \chi &= 0,658 \lambda_0^2, \text{ para } \lambda_0 \leq 1,5 \\ \chi &= \frac{0,877}{\lambda_0^2}, \text{ para } \lambda_0 > 1,5 \end{aligned} \right\} \text{fator de redução } \chi \quad (\text{A.12})$$

onde:

$\lambda_0$  é o índice de esbeltez reduzido, dado por:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Q A_g f_y}{N_e}} \left\} \text{índice de esbeltez reduzido } \lambda_0 \quad (\text{A.13})$$

onde:

$N_e$  é a força axial de flambagem elástica, definida na [subseção A.1.1.3](#).

Observando a [subseção A.1.1.1.1](#), percebe-se que os fatores de redução  $Q$  e  $\chi$  são dependentes um do outro. Dessa forma, é realizado um processo iterativo para determinação dos fatores.

#### A.1.1.3 Força axial de flambagem elástica - $N_e$

São necessárias três verificações para determinação da força axial de flambagem elástica, retiradas do Anexo E da [ABNT NBR 8800 \(2008\)](#):

a) para flambagem por flexão em relação ao eixo central de inércia  $x$  da seção transversal:

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 E I_x}{(K_x L_x)^2} \quad (\text{A.14})$$

b) para flambagem por flexão em relação ao eixo central de inércia  $y$  da seção transversal:

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 E I_y}{(K_y L_y)^2} \quad (\text{A.15})$$

c) para flambagem por torção em relação ao eixo longitudinal  $z$ :

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left[ \frac{\pi^2 E C_w}{(K_z L_z)^2} + G J \right] \quad (\text{A.16})$$

onde:

$K_x L_x$  é o comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo  $x$

$I_x$  é o momento de inércia da seção transversal  $x$ ;

$K_y L_y$  é o comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo  $y$

$I_y$  é o momento de inércia da seção transversal  $y$ ;

$K_z L_z$  é o comprimento de flambagem por torção;

$E$  é o módulo de elasticidade do aço;

$C_w$  é a constante de desempenamento da seção transversal;

$G$  é o módulo de elasticidade transversal do aço;

$J$  é a constante de torção da seção transversal;

$r_0$  é o raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de cisalhamento, dado por:

$$r_0 = \sqrt{(r_x^2 + r_y^2 + x_0^2 + y_0^2)} \quad (\text{A.17})$$

onde:

$r_x$  é o raio de giração em relação ao eixo central  $x$ ;

$r_y$  é o raio de giração em relação ao eixo central  $y$ ;

$x_0$  e  $y_0$  são as coordenadas do centro de cisalhamento na direção dos eixos centrais  $x$  e  $y$ , respectivamente, em relação ao centro geométrico da seção.

### A.1.2 Momento fletor resistente de cálculo - $M_{Rd}$

O momento fletor resistente de cálculo é determinado considerando os estados-limites últimos de flambagem lateral com torção (FLT), flambagem local da mesa comprimida (FLM) e flambagem local da alma (FLA). As barras de aço fletidas poderão ter as tensões internas variando do campo elástico ao campo plástico e são classificadas em 4 classes: seções supercompactas, seções compactas, seções semicompactas e seções esbeltas (PINHEIRO, 2005).

#### A.1.2.1 Vigas de alma não-esbelta

Para este caso, vigas de alma não-esbelta podem ser classificadas como seções supercompactas, seções compactas e seções semicompactas e são constituídas por perfil I cuja alma, perpendicular ao eixo de flexão, tem parâmetro de esbeltez  $\lambda_{FLA}$  inferior ou igual a  $\lambda_{r,FLA}$ :

$$\lambda_{FLA} \leq \lambda_{r,FLA} \quad (\text{A.18})$$

para:

$$\lambda_{FLA} = \frac{h}{t_w} \quad (\text{A.19})$$

$$\lambda_{r,FLA} = 5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (\text{A.20})$$

onde:

$h$  é a altura da alma do perfil I;

$t_w$  é a espessura da alma do perfil I;

$E$  é o módulo de elasticidade do aço, especificado na [seção 4.8](#);

$f_y$  é a resistência ao escoamento da barra redonda rosqueada à tração, especificada na seção 4.8;

#### A.1.2.1.1 Flambagem lateral com torção - FLT

Para o estado-limite último FLT, o momento fletor resistente de cálculo é dado por:

a) Viga com elementos compactos:

$$M_{Rd,FLT} = \frac{M_{pl,FLT}}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda \leq \lambda_p \quad (\text{A.21})$$

b) Viga com elementos semicompactos:

$$M_{Rd,FLT} = \frac{C_b}{\gamma_{a1}} \left[ M_{pl,FLT} - (M_{pl,FLT} - M_{r,FLT}) \frac{\lambda_{FLT} - \lambda_{p,FLT}}{\lambda_{r,FLT} - \lambda_{p,FLT}} \right] \leq \frac{M_{pl,FLT}}{\gamma_{a1}} \quad (\text{A.22})$$

para  $\lambda_{p,FLT} < \lambda \leq \lambda_{r,FLT}$

c) Viga com elementos esbeltos:

$$M_{Rd,FLT} = \frac{M_{cr,FLT}}{\gamma_{a1}} \leq \frac{M_{pl,FLT}}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda_{FLT} > \lambda_{r,FLT} \quad (\text{A.23})$$

para:

$$\lambda_{FLT} = \frac{L_b}{r_y} \quad (\text{A.24})$$

$$\lambda_{p,FLT} = 1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (\text{A.25})$$

$$\lambda_{r,FLT} = \frac{1,38 \sqrt{I_y J}}{r_y J \beta_1} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 C_w \beta_1^2}{I_y}}} \quad (\text{A.26})$$

$$M_{pl,FLT} = Z f_y \quad (\text{A.27})$$

$$M_{r,FLT} = 0,7 f_y W \quad (\text{A.28})$$

$$M_{cr,FLT} = \frac{C_b \pi^2 E I_y}{L_b^2} \sqrt{\frac{C_w}{I_y}} (1 + 0,0039 \frac{J L_b^2}{C_w}) \quad (\text{A.29})$$

onde:

$$\beta_1 = \frac{(0,7 f_y) W}{E J} \quad (\text{A.30})$$



## A.1.2.1.2 Flambagem local da mesa comprimida - FLM

Para o estado-limite último FLM, o momento fletor resistente de cálculo é dado por:

a) Viga com mesa compacta:

$$M_{Rd,FLM} = \frac{M_{pl,FLM}}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda \leq \lambda_p \quad (\text{A.31})$$

b) Viga com mesa semicompacta:

$$M_{Rd,FLM} = \frac{C_b}{\gamma_{a1}} \left[ M_{pl,FLM} - (M_{pl,FLM} - M_{r,FLM}) \frac{\lambda_{FLM} - \lambda_{p,FLM}}{\lambda_{r,FLM} - \lambda_{p,FLM}} \right] \quad (\text{A.32})$$

para  $\lambda_{p,FLM} < \lambda \leq \lambda_{r,FLM}$

c) Viga com mesa esbelta:

$$M_{Rd,FLM} = \frac{M_{cr,FLM}}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda_{FLM} > \lambda_{r,FLM} \quad (\text{A.33})$$

para:

$$\lambda_{FLM} = \frac{b}{t} \quad (\text{A.34})$$

$$\lambda_{p,FLM} = 0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (\text{A.35})$$

$$\lambda_{r,FLM} = 0,83 \sqrt{\frac{E}{0,7f_y}} \quad (\text{A.36})$$

## A.1.2.1.3 Flambagem local da alma - FLA

Para o estado-limite último FLA, o momento fletor resistente de cálculo é dado por:

a) Viga com alma compacta:

$$M_{Rd,FLA} = \frac{M_{pl,FLA}}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda \leq \lambda_p \quad (\text{A.37})$$

b) Viga com alma semicompacta:

$$M_{Rd,FLA} = \frac{C_b}{\gamma_{a1}} \left[ M_{pl,FLA} - (M_{pl,FLA} - M_{r,FLA}) \frac{\lambda_{FLA} - \lambda_{p,FLA}}{\lambda_{r,FLA} - \lambda_{p,FLA}} \right], \text{ para } \lambda_{p,FLA} < \lambda \leq \lambda_{r,FLA} \quad (\text{A.38})$$

para:

$$\lambda_{FLA} = \frac{h}{t_w} \quad (\text{A.39})$$

$$\lambda_{p,FLA} = 3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (\text{A.40})$$

$$\lambda_{r,FLA} = 5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (\text{A.41})$$

Caso o parâmetro de esbeltez  $\lambda_{FLA}$  seja maior do que  $\lambda_{r,FLA}$ , a viga é considerada esbelta e o  $M_{Rd}$  é calculado na [subseção A.1.2.2](#).

#### A.1.2.2 Vigas de alma esbelta

Vigas de alma esbelta são aquelas em que  $\lambda_{FLA}$  é maior do que  $\lambda_{r,FLA}$ , calculados na [subseção A.1.2.1](#).

##### A.1.2.2.1 Flambagem lateral com torção - FLT

Para o estado-limite último FLT, o momento fletor resistente de cálculo é dado por:

a) Viga com elementos compactos:

$$M_{Rd,FLT} = \frac{k_{pg} W_{xc} f_y}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \gamma_{FLT} \leq \gamma_{p,FLT} \quad (\text{A.42})$$

b) Viga com elementos semicompactos:

$$M_{Rd,FLT} = \frac{1}{\gamma_{a1}} C_b k_{pg} \left[ 1 - 0,3 \left( \frac{\lambda_{FLT} - \lambda_{p,FLT}}{\lambda_{r,FLT} - \lambda_{p,FLT}} \right) \right] W_{xc} f_y \leq \frac{k_{pg} W_{xc} f_y}{\gamma_{a1}} \quad (\text{A.43})$$

c) Viga com elementos esbeltos:

$$M_{Rd,FLT} = \frac{1}{\gamma_{a1}} \frac{C_b k_{pg} \pi^2 E W_{xc}}{\lambda_{FLT}} \leq \frac{k_{pg} W_{xc} f_y}{\gamma_{a1}} \quad (\text{A.44})$$

com:

$$\lambda_{FLT} = \frac{L_b}{r_{yT}} \quad (\text{A.45})$$

$$\lambda_{p,FLT} = 1,10 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (\text{A.46})$$

$$\lambda_{r,FLT} = \pi \sqrt{\frac{E}{0,7 f_y}} \quad (\text{A.47})$$

## A.1.2.2.2 Flambagem local da mesa comprimida - FLM

Para o estado-limite último FLM, o momento fletor resistente de cálculo é dado por:

a) Viga com mesa compacta:

$$M_{Rd,FLM} = \frac{k_{pg} W_{xc} f_y}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \gamma_{FLM} \leq \gamma_{p,FLM} \quad (\text{A.48})$$

b) Viga com mesa semicompacta:

$$M_{Rd,FLM} = \frac{1}{\gamma_{a1}} k_{pg} \left[ 1 - 0,3 \left( \frac{\lambda_{FLM} - \lambda_{p,FLM}}{\lambda_{r,FLM} - \lambda_{p,FLM}} \right) \right] W_{xc} f_y \quad (\text{A.49})$$

c) Viga com mesa esbelta:

$$M_{Rd,FLM} = \frac{1}{\gamma_{a1}} \frac{0,90 k_{pg} E k_c W_{xc}}{\lambda_{FLM}^2} \quad (\text{A.50})$$

com:

$$\lambda_{FLT} = \frac{b_f}{2t_f} \quad (\text{A.51})$$

$$\lambda_{p,FLT} = 0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (\text{A.52})$$

$$\lambda_{r,FLT} = 0,95 \sqrt{\frac{k_c E}{0,7 f_y}} \quad (\text{A.53})$$

A.1.3 Força cortante resistente de cálculo -  $V_{Rd}$ 

Os valores da força cortante resistente de cálculo,  $V_{Rd}$ , deve ser calculado considerando os estados-limites últimos de escoamento e flambagem por cisalhamento. Para o caso estudado, com perfis I fletidos em relação ao eixo perpendicular à alma (eixo de maior momento de inércia), o elemento resistente à força cortante é a alma. A força cortante resistente de cálculo é dada por:

a) Viga com alma compacta:

$$V_{Rd} = \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda \leq \lambda_p \quad (\text{A.54})$$

b) Viga com alma semicompacta:

$$V_{Rd} = \frac{\lambda_p}{\lambda} \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r \quad (\text{A.55})$$

c) Viga com alma esbelta:

$$V_{Rd} = 1,24 \left( \frac{\lambda_p}{\lambda} \right)^2 \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda > \lambda_r \quad (\text{A.56})$$

para:

$$\lambda = \frac{h}{t_w} \quad (\text{A.57})$$

$$\lambda_p = 1,10 \sqrt{\frac{5E}{f_y}} \quad (\text{A.58})$$

$$\lambda_r = 1,37 \sqrt{\frac{5E}{f_y}} \quad (\text{A.59})$$

onde:

$h$  é a altura da alma, tomada igual à distância entre as faces internas das mesas nos perfis menos os dois raios de concordância entre mesa e alma;

$t_w$  é a espessura da alma;

$V_{pl}$  é o força cortante correspondente à plastificação da alma por cisalhamento:

$$V_{pl} = 0,60 A_w f_y \quad (\text{A.60})$$

com:

$A_w$  é a área efetiva de cisalhamento, que deve ser tomada igual a:

$$A_w = d t_w \quad (\text{A.61})$$

onde:

$d$  é a altura total da seção transversal;

$t_w$  é a espessura da alma;

#### A.1.4 Combinação de força axial e momento fletor

Quando há ação simultânea de esforços, deve ser feita a verificação do estado limite último para a combinação de esforços solicitantes. Para a atuação simultânea da força axial de tração ou de compressão, deve ser obedecida a seguinte condição:

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{8}{9} \left( \frac{M_{Sd}}{M_{Rd}} \right) \leq 1,0, \text{ quando } \frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} \geq 0,2 \quad (\text{A.62})$$

$$\frac{N_{Sd}}{2N_{Rd}} + \left( \frac{M_{Sd}}{M_{Rd}} \right) \leq 1,0, \text{ quando } \frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} < 0,2 \quad (\text{A.63})$$

onde:

$N_{Sd}$  é a força axial solicitante de cálculo;

$N_{Rd}$  é a força axial resistente de cálculo;

$M_{Sd}$  é o momento fletor solicitante de cálculo;

$M_{Rd}$  é o momento fletor resistente de cálculo.

## A.2 Treliças

### A.2.1 Força axial de compressão resistente de cálculo - $N_{c,Rd}$

A força axial de compressão resistente de cálculo de uma barra com perfil cantoneira associada ao estado-limite último de flambagem local, deve ser determinada pela [Equação A.1](#), da mesma forma que para as vigas. No entanto, os fatores de redução  $\chi$  e  $Q$  serão diferentes e calculados para o perfil cantoneira.

#### A.2.1.1 Fator de redução $Q$

Perfis cantoneiras possuem apenas elementos AL, ou seja, com só uma borda longitudinal vinculada, relativo às abas. O fator de redução  $Q$  é calculado através das seguintes expressões:

$$Q = 1,00, \text{ para } \frac{b}{t} \leq \left(\frac{b}{t}\right)_{lim} \quad (\text{A.64})$$

$$Q = Q_s, \text{ para } \frac{b}{t} > \left(\frac{b}{t}\right)_{lim} \quad (\text{A.65})$$

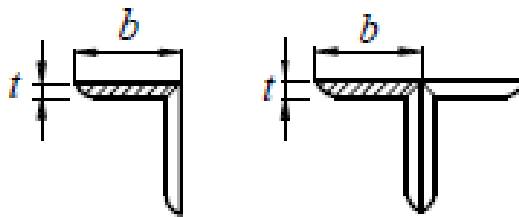
onde:

$b$  é a largura de uma aba ([Figura 53](#));

$t$  é a espessura de uma aba ([Figura 53](#));

$Q_s$  é o fator de redução que leva em conta a flambagem local das abas, definido na [subseção A.2.1.1.1](#) e [subseção A.2.1.1.1](#) para cantoneiras simples e duplas, respectivamente.

Figura 53 – Largura e espessura das abas para o perfil cantoneira simples e duplo.



Fonte: Adaptado ([ABNT NBR 8800, 2008](#))

Conforme mencionado, serão utilizados perfis cantoneira simples e duplos, de modo que o fator de redução  $Q$  será calculado de maneira distinta para cada perfil.

#### A.2.1.1.1 Perfil cantoneira simples

A relação entre largura e espessura limite para perfis cantoneira simples é dada por:

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{lim} = 0,45\sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (A.66)$$

onde:

$b$  é a largura da aba (Figura 53);

$t$  é a espessura da aba (Figura 53).

O fator de redução relativo à flambagem local da aba para cantoneira simples é dado:

$$Q_s = 1,340 - 0,76\frac{b}{t}\sqrt{\frac{f_y}{E}}, \text{ para } 0,45\sqrt{\frac{E}{f_y}} < \frac{b}{t} \leq 0,91\sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (A.67)$$

$$Q_s = \frac{0,53E}{f_y\left(\frac{b}{t}\right)^2}, \text{ para } \frac{b}{t} > 0,91\sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (A.68)$$

#### A.2.1.1.2 Perfil cantoneira dupla

A relação entre largura e espessura limite para perfis cantoneira duplo é dada por:

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{lim} = 0,56\sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (A.69)$$

onde:

$b$  é a largura da aba de uma cantoneira (Figura 53);

$t$  é a espessura da aba de uma cantoneira (Figura 53).

O fator de redução relativo à flambagem local da aba para cantoneira dupla é dado:

$$Q_s = 1,415 - 0,74\frac{b}{t}\sqrt{\frac{f_y}{E}}, \text{ para } 0,56\sqrt{\frac{E}{f_y}} < \frac{b}{t} \leq 1,03\sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (A.70)$$

$$Q_s = \frac{0,69E}{f_y\left(\frac{b}{t}\right)^2}, \text{ para } \frac{b}{t} > 1,03\sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (A.71)$$

Considerou-se que o perfil duplo é formado por dois perfis cantoneira simples, ligados continuamente através de suas abas.

### A.2.1.2 Fator de redução $\chi$

O fator de redução  $\chi$  para treliças é calculado da mesma forma que para as vigas, detalhado na [subseção A.1.1.2](#). No entanto a força axial de flambagem elástica será diferente e deverá ser calculada para os perfis cantoneira.

### A.2.1.3 Força axial de flambagem elástica - $N_e$

De acordo com a [ABNT NBR 8800 \(2008\)](#), a força axial de flambagem elástica,  $N_e$ , de uma barra com seção monossimétrica, cujo eixo  $y$  é o eixo de simetria, será o menor valor dos dois casos abaixo:

a) para flambagem elástica por flexão em relação ao eixo central de inércia  $x$  da seção transversal:

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 EI_x}{(K_x L_x)^2} \quad (\text{A.72})$$

b) para flambagem elástica por flexo-torção:

$$N_{eyz} = \frac{N_{ey} + N_{ez}}{2[1 - (y_0/r_0)^2]} \left[ 1 - \sqrt{\frac{4N_{ey}N_{ez}[1 - (y_0/r_0)^2]}{(N_{ey} + N_{ez})^2}} \right] \quad (\text{A.73})$$

onde:

$K_x L_x$  é o comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo  $x$

$I_x$  é o momento de inércia da seção transversal  $x$ ;

$N_{ey}$  e  $N_{ez}$  são calculados na [subseção A.1.1.3](#).

$x_0$  e  $y_0$  são as coordenadas do centro de cisalhamento na direção dos eixos centrais  $x$  e  $y$ , respectivamente, em relação ao centro geométrico da seção.

$r_0$  é o raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de cisalhamento, dado na [Equação A.17](#).

## A.2.2 Força axial de tração resistente de cálculo - $N_{t,Rd}$

Para a [ABNT NBR 8800 \(2008\)](#), a força axial de tração resistente de cálculo,  $N_{t,Rd}$ , a ser usada no dimensionamento é o menor dos seguintes valores, considerando-se os estados-limites últimos de escoamento da seção bruta e ruptura da seção líquida, de acordo com as expressões:

a) para escoamento da seção bruta

$$F_{t,Rd} = \frac{A_g f_y}{\gamma_{a1}} \quad (\text{A.74})$$

b) para ruptura da seção líquida

$$F_{t,Rd} = \frac{A_e f_u}{\gamma_{a2}} \quad (\text{A.75})$$

onde:

$f_y$  é a resistência ao escoamento da barra redonda rosqueada à tração, especificada na seção 4.8;

$f_u$  é a resistência à ruptura da barra redonda rosqueada à tração, especificada na seção 4.8;

$\gamma_{a1}$  e  $\gamma_{a2}$  são coeficientes de ponderação das resistências, obtidos na ABNT NBR 8800 (2008);

$A_g$  é a área bruta da seção transversal da barra, dada por:

$$A_g = 0,25\pi d^2 \quad (\text{A.76})$$

$A_e$  é a área líquida efetiva da seção transversal da barra, dada por:

$$A_e = C_t A_g \quad (\text{A.77})$$

onde:

$C_t$  é um coeficiente de redução da área líquida, adotado, por simplificação, igual a 0,8.

Os valores da capacidade resistente,  $F_{c,Rd}$  e  $F_{t,Rd}$ , deverão ser comparados à solicitação após a combinação de ações, detalhada na seção 5.2.

### A.3 Tirantes

A força de tração resistente de cálculo de uma barra redonda rosqueada tracionada é dada por:

a) para escoamento da seção bruta

$$F_{t,Rd} = \frac{A_g f_y}{\gamma_{a1}} \quad (\text{A.78})$$

b) para ruptura da seção líquida

$$F_{t,Rd} = \frac{A_e f_u}{\gamma_{a2}} \quad (\text{A.79})$$

onde:

$f_y$  é a resistência ao escoamento da barra redonda rosqueada à tração, especificada na seção 4.8;

$f_u$  é a resistência à ruptura da barra redonda rosqueada à tração, especificada na seção 4.8;



$\gamma_{a1}$  e  $\gamma_{a2}$  são coeficientes de ponderação das resistências, obtidos na [ABNT NBR 8800 \(2008\)](#);

$A_g$  é a área bruta da seção transversal da barra, dada por:

$$A_g = 0,25\pi d^2 \quad (\text{A.80})$$

$A_e$  é a área efetiva da seção transversal de uma barra com diâmetro externo da rosca  $d$ , dada por:

$$A_e = 0,75A_g \quad (\text{A.81})$$



## APÊNDICE B – Propriedades dos Perfis Adotados

### B.1 Cantoneiras de Abas Iguais

Os perfis das barras das treliças e dos travamentos do banzo inferior da treliça são do tipo cantoneira de abas iguais e sua seção típica pode ser vista na [Figura 54](#). Na [Tabela 9](#) tem-se a lista de opções de perfis que podem ser selecionados no processo de otimização.

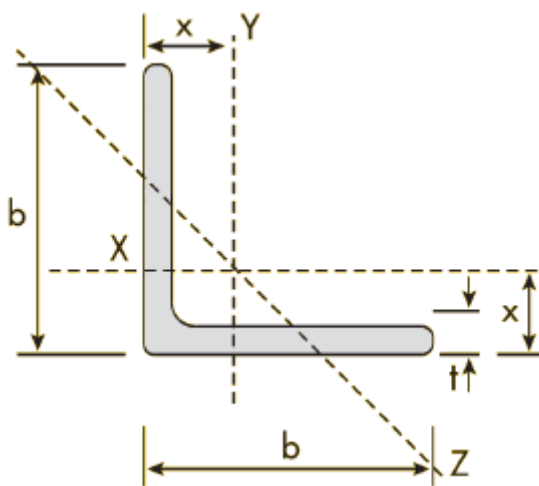
### B.2 Perfil Laminado Tipo I

Os perfis das vigas são do tipo I e sua seção típica pode ser vista na [Figura 55](#). Na [Tabela 10](#) tem-se a lista de opções de perfis que podem ser selecionados no processo de otimização.

### B.3 Perfis U de Chapas Dobradas

As terças utilizadas na coberturas são de perfis U formados a frio por meio de chapas dobradas, conforme o padrão da [Figura 56](#). Os perfis disponíveis para a otimização

Figura 54 – Seção Típica – Cantoneira de Abas Iguais.



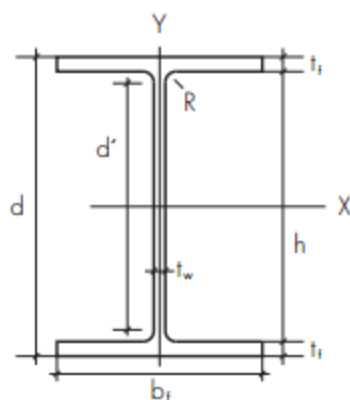
Fonte: ([GERDAU, 2011](#))

Tabela 9 – Perfis cantoneira de abas iguais

Índice	Área ( $cm^2$ )	$b_w$ (mm)	$t_w$ (mm)	$I_x = I_y$ ( $cm^4$ )	$r_x = r_y$ (cm)	$r_{min}$ (cm)	$\bar{x}$ (cm)	Custo (R\$/kg)
1	1,48	25,40	3,18	0,83	0,79	0,48	0,76	3,20
2	1,93	31,75	3,18	1,67	0,97	0,64	0,89	3,20
3	2,32	38,10	3,18	3,33	1,17	0,76	1,07	3,20
4	2,71	44,45	3,18	5,41	1,40	0,89	1,22	3,20
5	3,10	50,80	3,18	7,91	1,60	1,02	1,40	3,20
6	4,58	50,80	4,76	11,70	1,58	1,02	1,45	3,20
7	5,80	63,50	4,76	23,00	1,98	1,24	1,75	3,20
8	7,03	76,20	4,76	40,00	2,39	1,50	2,08	3,20
9	9,29	76,20	6,35	50,00	2,36	1,50	2,13	3,20
10	10,90	88,90	6,35	83,70	2,77	1,76	2,46	3,20
11	12,51	101,60	6,35	125,00	3,17	2,00	2,77	3,20
12	15,48	101,60	7,94	154,00	3,15	2,00	2,84	3,20
13	15,73	127,00	6,35	251,63	4,00	2,53	3,41	3,20
14	19,50	127,00	7,94	308,00	3,97	2,53	3,47	3,20
15	23,29	127,00	9,52	362,00	3,94	2,51	3,53	3,20
16	28,10	152,40	9,52	641,00	4,78	3,02	4,17	3,20
17	37,09	152,40	12,70	828,00	4,72	3,00	4,27	3,20

Fonte: Adaptado (GERDAU, 2016)

Figura 55 – Seção Típica – Perfil I.



Fonte: (GERDAU, 2016)

Tabela 10 – Perfis laminado tipo I

Índice	Bitola <i>mm x kg/m</i>	Área ( <i>cm</i> <sup>2</sup> )	<i>d</i> ( <i>mm</i> )	<i>b<sub>f</sub></i> ( <i>mm</i> )	<i>t<sub>w</sub></i> ( <i>mm</i> )	<i>t<sub>f</sub></i> ( <i>mm</i> )	<i>r<sub>x</sub></i> ( <i>cm</i> )	<i>r<sub>y</sub></i> ( <i>cm</i> )
1	3" 76,2 x 8,48	10,8	76	59	4,3	6,6	3,12	1,33
2	3" 76,2 x 9,68	12,3	76	61	6,4	6,6	3,06	1,92
3	4" 101,6 x 11,46	14,5	102	68	4,9	7,4	4,17	1,48
4	4" 101,6 x 12,65	16,1	102	69	6,4	7,4	4,06	1,46
5	W 150 x 13,0	16,6	148	100	4,3	4,9	6,18	2,60
6	W 150 x 18,0	23,4	153	102	5,8	7,1	6,34	2,69
7	W 150 x 22,5	29,0	152	152	5,8	6,6	6,51	4,10
8	W 150 x 24,0	31,5	160	102	6,6	10,3	6,63	2,73
9	W 150 x 29,8	38,5	157	153	6,6	9,3	6,72	4,18
10	W 150 x 37,1	47,8	162	154	8,1	11,6	6,85	4,22
11	W 200 x 15,0	19,4	200	100	4,3	5,2	8,20	2,12
12	W 200 x 19,3	25,1	203	102	5,8	6,5	8,19	2,14
13	W 200 x 22,5	29,0	206	102	6,2	8,0	8,37	2,22
14	W 200 x 26,6	34,2	207	133	5,8	8,4	8,73	3,10
15	W 200 x 31,3	40,3	210	134	6,4	10,2	8,86	3,19
16	W 200 x 35,9	45,7	201	165	6,2	10,2	8,67	4,09
17	W 200 x 41,7	53,5	205	166	7,2	11,8	8,77	4,10
18	W 200 x 46,1	58,6	203	203	7,2	11,0	8,81	5,12
19	W 200 x 52,0	66,9	206	204	7,9	12,6	8,90	5,16
20	HP 200 x 53,0	68,1	204	207	11,3	11,3	8,55	4,96
21	W 200 x 59,0	76,0	210	205	9,1	14,2	8,99	5,18
22	W 200 x 71,0	91,0	216	206	10,2	17,4	9,17	5,28
23	W 200 x 86,0	110,9	222	209	13,0	20,6	9,26	5,32
24	W 250 x 17,9	23,1	251	101	4,8	5,3	9,96	1,99
25	W 250 x 22,3	28,9	254	102	5,8	6,9	10,09	2,06
26	W 250 x 25,3	32,6	257	102	6,1	8,4	10,31	2,14
27	W 250 x 28,4	36,6	260	102	6,4	10,0	10,51	2,20
28	W 250 x 32,7	42,1	258	146	6,1	9,1	10,83	3,35
29	W 250 x 38,5	49,6	262	147	6,6	11,2	11,05	3,46
30	W 250 x 44,8	57,6	266	148	7,6	13,0	11,15	3,50
31	HP 250 x 62,0	79,6	246	256	10,5	10,7	10,47	6,13
32	W 250 x 73,0	92,7	253	254	8,6	14,2	11,02	6,47
33	W 250 x 80,0	101,9	256	255	9,4	15,6	11,10	6,51
34	HP 250 x 85,0	108,5	254	260	14,4	14,4	10,64	6,24
35	W 250 x 89,0	113,9	260	256	10,7	17,3	11,18	6,52
36	W 250 x 101,0	128,7	264	257	11,9	19,6	11,27	6,57
37	W 250 x 115,0	146,1	269	259	13,5	22,1	11,38	6,62
38	W 310 x 21,0	27,2	303	101	5,1	5,7	11,77	1,90
39	W 310 x 23,8	30,7	305	101	5,6	6,7	11,89	1,94
40	W 310 x 28,3	36,5	309	102	6,0	8,9	12,28	2,08
41	W 310 x 32,7	42,1	313	102	6,6	10,8	12,49	2,13
42	W 310 x 38,7	49,7	310	165	5,8	9,7	13,14	3,82
43	W 310 x 44,5	57,2	313	166	6,6	11,2	13,22	3,87
44	W 310 x 52,0	67,0	317	167	7,6	13,2	13,33	3,91
45	HP 310 x 79,0	100,0	299	306	11,0	11,0	12,77	7,25
46	HP 310 x 93,0	119,2	303	308	13,1	13,1	12,85	7,32
47	W 310 x 97,0	123,6	308	305	9,9	15,4	13,43	7,68
48	W 310 x 107,0	136,4	311	306	10,9	17,0	13,49	7,72
49	HP 310 x 110,0	141,0	308	310	15,4	15,5	12,97	7,39
50	W 310 x 117,0	149,9	314	307	11,9	18,7	13,56	7,76
51	HP 310 x 125,0	159,0	312	312	17,4	17,4	13,05	7,45

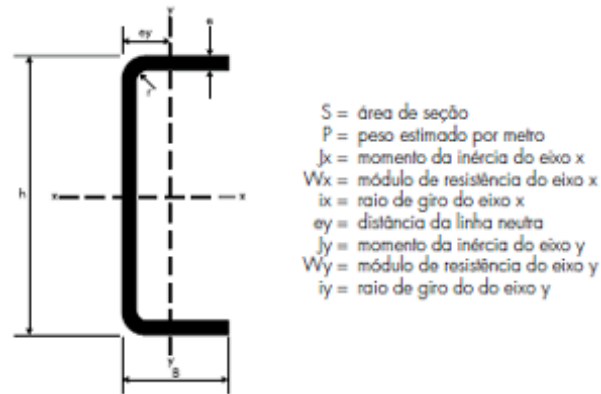
Fonte: Adaptado (GERDAU, 2016)

Tabela 11 – Perfis laminado tipo I

$\tilde{Índice} I_x$ ( $cm^4$ )	$I_y$ ( $cm^4$ )	$C_w$ ( $cm^4$ )	$W_x$ ( $cm^3$ )	$Z_x$ ( $cm^3$ )	$Custo$ (R\$/kg)
1 105	19	300	27,6	30,4	3,52
2 115	46	700	30,2	33,2	3,52
3 252	32	800	49,7	54,7	3,52
4 266	34	900	52,4	57,7	3,52
5 635	82	4181	85,8	96,4	3,11
6 939	126	6683	122,8	139,4	3,11
7 1229	387	20417	161,7	179,6	3,11
8 1384	183	10206	173,0	197,6	3,11
9 1739	556	30277	221,5	247,5	3,11
10 2244	707	39930	277,0	313,5	3,11
11 1305	87	8222	130,5	147,9	3,11
12 1686	116	11098	166,1	190,6	3,11
13 2029	142	13868	197,0	225,5	3,11
14 2611	330	32477	252,3	282,3	3,11
15 3168	410	40822	301,7	338,6	3,11
16 3437	764	69502	342,0	379,2	3,11
17 4114	901	83948	401,4	448,6	3,11
18 4543	1535	141342	447,6	495,3	3,11
19 5298	1784	166710	514,4	572,5	3,11
20 4977	1673	155075	488,0	551,3	3,11
21 6140	2041	195418	584,8	655,9	3,11
22 7660	2537	249976	709,2	803,2	3,11
23 9498	3139	317844	855,7	984,2	3,11
24 2291	91	13735	182,6	211,0	3,11
25 2939	123	18629	231,4	267,7	3,11
26 3473	149	22955	270,2	311,1	3,11
27 4046	178	27636	311,2	357,3	3,11
28 4937	473	73104	382,7	428,5	3,11
29 6057	594	93242	462,4	517,8	3,11
30 7158	704	112398	538,2	606,3	3,11
31 8728	2995	417130	709,6	790,5	3,11
32 11257	3880	552900	889,9	983,3	3,11
33 12550	4313	622878	980,5	1088,7	3,11
34 12280	4225	605403	966,9	1093,2	3,11
35 14237	4841	712351	1095,1	1224,4	3,11
36 16352	5549	828031	1238,8	1395,0	3,11
37 18920	6405	975265	1406,7	1597,4	3,11
38 3776	98	21628	249,2	291,9	3,11
39 4346	116	25594	285,0	333,2	3,11
40 5500	158	35441	356,0	412,0	3,11
41 6570	192	43612	419,8	485,3	3,11
42 8581	727	163728	553,6	615,4	3,11
43 9997	855	194433	638,8	712,8	3,11
44 11909	1026	236422	751,4	842,5	3,11
45 16316	5258	1089258	1091,3	1210,1	3,11
46 19682	6387	1340320	1299,1	1450,3	3,11
47 22284	7286	1558682	1447,0	1594,2	3,11
48 24839	8123	1754271	1597,3	1768,2	3,11
49 23703	7707	1646104	1539,1	1730,6	3,11
50 27563	9024	1965950	1755,6	1952,6	3,11
51 27076	8823	1911029	1735,6	1963,3	3,11

Fonte: Adaptado ([GERDAU, 2016](#))

Figura 56 – Seção Típica – Perfil U formado a frio.



Fonte: (GERDAU, 2016)

Tabela 12 – Perfis tipo U formado a frio

Índice	Área ( $\text{cm}^2$ )	$W_x$ ( $\text{cm}^3$ )	$W_y$ ( $\text{cm}^3$ )	$I_x$ ( $\text{cm}^4$ )	Custo (R\$/kg)
1	3,65	11,6	2,52	58,1	3,55
2	4,35	13,7	3	68,5	3,55
3	4,6	19,9	2,66	149,9	3,55
4	5,49	23,6	3,17	177,4	3,55
5	5,55	29,9	2,74	299,3	3,55
6	6,63	35,4	3,26	354,9	3,55
7	7,7	40,9	3,78	409,3	3,55
8	8,75	46,2	4,29	462,4	3,55
9	9,8	51,4	4,79	514,1	3,55
10	10,83	56,4	5,29	564,5	3,55
11	11,85	61,3	5,77	613,6	3,55
12	13,39	68,6	6,51	686,2	3,55
13	16,02	90,5	13,2	905,6	3,55
14	17,02	100	17,11	1000,7	3,55
15	22,59	152,8	18,36	1910,7	3,55

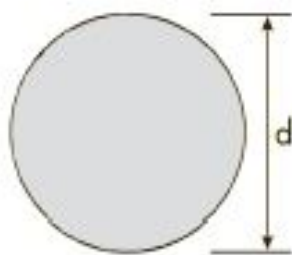
Fonte: Adaptado (GERDAU, 2016)

estão na Tabela 12.

## B.4 Barras Redondas Trefiladas

Os tirantes em X e em Y adotados para a estrutura são formados por barras redondas trefiladas. A Figura 57 apresenta a seção típica e a Tabela 13 apresenta os diâmetros disponíveis.

Figura 57 – Seção Típica – Barra Redonda Trefilada.



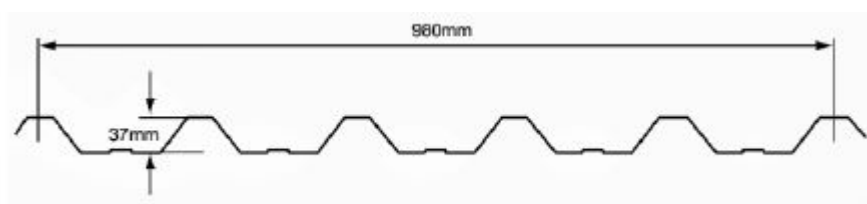
Fonte: (GERDAU, 2016)

Tabela 13 – Perfis de Barras Redondas Trefiladas – Tirantes em Y e Tirantes em X

Índice	Diâmetro (mm)	Custo (R\$/kg)
1	12,00	4,01
2	12,70	4,01
3	13,30	4,01
4	14,00	4,01
5	14,28	4,01
6	14,35	4,01
7	14,50	4,01
8	15,00	4,01

Fonte: Adaptado (GERDAU, 2016)

Figura 58 – Seção Típica – Telha Trapezoidal 40.



Fonte: (ABCEM, 2009)

## B.5 Telhas Trapezoidal 40

As telhas escolhidas para o tamponamento da cobertura são do tipo Trapezoidal 40, conforme Figura 58. Suas características podem ser vistas na Tabela 14.



Tabela 14 – Tabela de Cargas Admissíveis para as Telhas ( $N/m^2$ ).

Espessura (mm)	Nº de apoios	Distância entre apoios (m)						Custo (R\$/kg)
		1,75	2	2,25	2,5	2,75	3	
0,43	4	2200	1690	1330	1020	770	590	4,48
0,50	4	2550	1950	1540	1190	890	690	4,48
0,65	4	3300	2530	2000	1530	1150	890	4,48
0,80	4	4040	3090	2440	1870	1410	1080	4,48
0,95	4	4760	3650	2880	2210	1660	1280	4,48
1,25	4	6190	4740	3750	2280	2160	1660	4,48

Fonte: ([ABCEM, 2009](#))



# APÊNDICE C – Resultados dos modelos otimizados

## C.1 Modelo 1

Tabela 15 – Resultados para o modelo 1 - Índice das variáveis

Largura do galpão (m)	Índice do perfil das vigas	Índice das telhas	Índice das terças	Índice dos tirantes em X	Índice dos tirantes em Y	Inclinação do telhado (%)	Número de terças (un)	Espaçamento entre terças (m)	Distância entre pórticos (m)
10	1	1	1	1	1	30,4	8	1,74	2,82
11	5	1	5	1	1	8,5	8	1,84	4,80
12	5	1	5	2	1	5,8	8	2,00	4,36
13	5	1	3	1	2	8,8	8	2,18	3,69
14	5	1	3	1	1	8,1	10	1,76	4,00
15	5	1	3	1	1	8,4	10	1,88	3,69
16	5	1	1	1	1	8,8	12	1,61	3,20
17	11	1	3	1	1	7,7	12	1,70	4,00
18	11	1	3	1	1	7,1	12	1,80	3,69
19	5	1	1	1	1	38,7	12	2,00	3,00
20	11	1	3	1	1	30,7	12	2,09	3,69
21	11	1	3	1	1	33,1	14	1,84	3,69
22	11	1	1	1	1	31,6	16	1,65	3,20
23	11	1	1	1	1	30,0	16	1,72	3,00
24	11	1	1	1	1	30,6	16	1,79	2,82
25	24	1	3	1	1	30,5	18	1,63	3,69
26	24	1	2	2	1	34,5	18	1,72	3,43
27	24	1	1	2	1	30,4	20	1,56	3,20
28	38	1	3	1	1	31,8	20	1,63	4,00
29	38	1	3	1	1	32,0	20	1,69	3,69
30	39	1	3	1	1	31,4	18	1,96	3,69
31	38	1	1	1	1	33,4	22	1,63	3,20
32	38	1	1	1	1	30,2	22	1,67	3,00
33	38	1	1	2	1	35,4	24	1,59	3,00
34	39	1	1	1	1	34,0	24	1,63	3,20
35	39	1	1	3	1	30,7	24	1,66	3,00
36	39	1	1	2	1	32,3	24	1,72	2,82
37	40	1	2	1	1	33,0	26	1,62	3,43
38	40	1	2	1	1	30,4	26	1,66	3,20
39	40	1	1	1	1	30,4	26	1,70	3,00
40	42	1	5	1	1	21,8	24	1,90	4,36

Tabela 16 – Resultados para o modelo 1 - Massas totais

Largura do galpão (m)	Massa total das telhas (kg)	Massa total das terças (kg)	Massa total dos tirantes em X (kg)	Massa total dos tirantes em Y (kg)	Massa total das vigas (kg)	Massa total da cobertura (kg)
10	1994,48	1100,13	70,62	240,74	1596,71	5002,68
11	2106,73	1672,81	109,52	172,72	1582,32	5644,10
12	2293,80	1672,81	114,50	194,06	1880,88	6156,05
13	2490,25	1386,47	91,26	260,08	2381,86	6609,92
14	2680,40	1733,09	124,09	225,62	2379,23	7142,43
15	2872,47	1733,09	117,66	252,09	2747,44	7722,75
16	3064,87	1650,20	127,13	291,84	3348,31	8482,35
17	3253,50	2079,70	154,40	257,28	3375,06	9119,94
18	3443,53	2079,70	145,86	285,91	3849,20	9804,20
19	3830,75	1650,20	128,17	370,47	4446,57	10426,16
20	3992,31	2079,70	150,62	322,11	4462,63	11007,37
21	4221,69	4221,69	175,76	333,36	4719,04	13671,54
22	4403,24	2200,26	178,94	385,71	5621,85	12790,00
23	4582,24	2200,26	171,79	421,79	6216,03	13592,11
24	4789,21	2200,26	166,11	462,89	6887,10	14505,57
25	4987,32	3119,55	229,26	377,89	6638,11	15352,13
26	5249,06	2950,01	244,15	419,66	7478,26	16341,14
27	5384,66	2750,33	255,10	453,29	8186,07	17029,45
28	5607,69	3466,17	276,13	388,26	8156,08	17894,33
29	5810,37	3466,17	259,45	428,15	9106,22	19070,36
30	6000,35	3119,55	237,52	442,22	10614,03	20413,67
31	6237,19	3025,37	513,52	513,52	11165,11	21454,71
32	6379,69	3025,37	243,89	554,96	12133,96	22337,87
33	6681,32	3300,40	297,14	576,34	12707,65	23562,85
34	6854,06	3300,40	280,64	556,54	13848,13	24839,77
35	6986,27	3300,40	329,21	600,01	14997,46	26213,35
36	7218,72	3300,40	289,00	654,03	16427,41	27889,56
37	7434,46	4261,13	323,39	560,99	16735,93	29315,90
38	7579,48	4261,13	307,02	607,42	18206,96	30962,01
39	7778,71	3575,43	293,79	659,47	19853,38	32160,78
40	7981,27	5018,42	371,57	484,67	19594,17	33450,10

Tabela 17 – Resultados para o modelo 1 - Custos totais

Largura do galpão (m)	Custo total das telhas (R\$)	Custo total das terças (R\$)	Custo total dos tirantes em X (R\$)	Custo total dos tirantes em Y (R\$)	Custo total das vigas (R\$)	Custo total da cobertura (R\$)
10	8935,29	3905,29	283,18	965,36	5620,41	19709,72
11	9438,16	5938,42	439,18	692,18	4921,02	21429,44
12	10276,23	5938,47	459,15	778,18	5849,55	23301,57
13	11156,34	4921,97	365,94	1042,93	7507,59	24894,77
14	12008,20	6152,46	497,61	904,75	7399,40	26962,43
15	12868,65	6152,46	471,82	1010,87	8544,53	29048,35
16	13730,64	5858,21	509,81	1170,29	10413,25	31682,22
17	14575,71	7382,95	619,13	1031,70	10496,44	34105,96
18	15427,04	7382,95	584,88	1146,50	11971,03	36512,42
19	17161,77	5858,21	513,98	1485,61	13828,86	38848,45
20	17885,57	7382,95	603,99	1291,68	13878,80	41043,01
21	18913,21	8613,45	704,81	1336,79	14676,22	44244,50
22	19726,53	7810,95	717,54	1546,70	17483,96	47285,70
23	20528,43	7810,95	688,87	1691,39	19331,86	50051,53
24	21455,67	7810,95	666,12	1856,21	21418,88	53207,85
25	22343,21	11074,43	919,35	1515,36	20644,53	56496,90
26	23515,79	10472,56	979,05	1682,87	23257,40	59907,68
27	24123,30	9763,69	1022,95	1817,73	25458,69	62186,37
28	25122,49	12304,92	1107,30	1556,95	25365,43	65457,11
29	26030,49	12304,92	1040,39	1716,91	28320,36	69413,09
30	26881,59	11074,43	952,46	1773,32	33009,64	73691,47
31	27942,64	10740,06	2059,23	1023,25	34723,51	76488,70
32	28581,03	10740,06	978,01	2225,41	37736,62	80261,14
33	29932,33	11716,43	1191,55	2311,13	39520,79	84672,25
34	30706,19	11716,43	1125,35	2231,76	43067,68	88847,42
35	31298,50	11716,43	1320,13	2406,04	46642,10	93383,21
36	32339,87	11716,43	1158,88	2622,67	51089,25	98927,12
37	33306,41	15127,03	1296,79	2249,60	52048,75	104028,60
38	33956,10	15127,03	1231,14	2435,78	56623,67	109373,75
39	34848,64	12692,80	1178,11	2644,49	61744,02	113108,07
40	35756,13	17815,39	1489,99	1943,53	60937,87	117942,93

## C.2 Modelo 2

Tabela 18 – Resultados para o modelo 2 - Índice das variáveis

	Largura do galpão (m)	Índice do perfil do banzo inferior	Índice do perfil do banzo superior	Índice do perfil dos montantes	Índice do perfil das diagonais	Índice das telhas	Índice das terças	Índice dos tirantes em X	Índice dos tirantes em Y	Índice das mãos-francesas	Inclinação do telhado (%)	Número de divisões de um banzo superior	Número de terças (un)	Espaçamento entre terças (un)	Distância entre pórticos (m)	Espaçamento entre banzos (m)	Número de travamentos (un)
10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	23,8	6	8	1,71	3,00	0,30	8
11	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	14,4	6	8	1,85	3,00	0,30	8
12	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	19,0	6	8	2,03	2,82	0,34	8
13	3	3	1	1	1	3	1	1	1	1	16,0	9	8	2,19	3,43	0,30	8
14	3	3	1	1	1	3	1	1	1	1	21,6	21	8	2,39	3,43	0,36	8
15	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	16,7	15	12	1,52	3,20	0,32	12
16	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	11,4	15	12	1,61	3,20	0,30	12
17	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	12,8	20	12	1,71	3,00	0,30	12
18	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	14,8	20	12	1,82	3,00	0,34	12
19	3	3	1	2	1	1	1	1	1	1	15,8	10	12	1,92	2,82	0,38	12
20	3	3	3	1	1	1	1	1	1	1	14,6	18	14	1,68	3,00	0,41	14
21	4	4	3	1	1	1	1	1	1	1	12,1	18	14	1,76	3,00	0,35	14
22	5	5	2	2	1	3	1	1	1	1	14,7	15	12	2,22	3,43	0,43	12
23	5	4	2	1	1	1	1	1	1	1	11,4	14	14	1,92	2,82	0,40	14
24	5	5	1	1	1	1	1	1	1	1	12,1	24	14	2,01	2,82	0,38	14
25	5	4	5	2	1	3	2	1	1	1	30,5	24	14	2,18	3,43	0,58	14
26	5	4	2	2	1	1	1	1	1	1	16,0	18	14	2,19	2,67	0,53	14
27	5	4	2	3	1	1	1	1	1	1	14,3	16	18	1,70	3,00	0,63	18
28	5	4	2	3	1	1	1	1	1	1	13,8	16	18	1,77	2,82	0,62	18
29	6	6	5	4	1	5	1	1	1	1	16,3	18	14	2,45	4,00	0,64	14
30	5	4	2	3	1	1	1	1	1	1	13,3	16	18	1,89	2,52	0,61	18
31	6	6	2	3	1	3	1	1	1	1	11,1	16	18	1,89	3,69	0,61	18
32	7	7	5	3	1	5	4	1	1	1	11,9	24	14	2,60	4,00	0,50	14
33	6	6	3	3	1	3	1	4	1	1	12,3	24	18	2,02	3,43	0,58	18
34	7	6	3	3	1	3	1	1	1	1	9,4	18	20	1,84	3,69	0,60	20
35	8	7	5	4	1	5	1	1	1	1	9,3	16	18	2,13	4,36	0,59	18
36	7	7	4	3	1	3	1	1	1	1	9,9	24	18	2,20	3,43	0,49	18
37	6	6	3	4	1	1	2	1	1	1	11,3	18	20	2,01	2,82	0,58	20
38	7	7	4	4	1	3	1	1	1	1	10,9	18	20	2,12	3,43	0,64	20
39	8	7	4	4	1	3	1	1	1	1	9,7	20	22	1,96	3,69	0,62	22
40	8	7	4	4	1	3	1	1	1	1	9,4	20	20	2,23	3,43	0,63	20

Tabela 19 – Resultados para o modelo 2 - Massas totais

Largura do galpão (m)	Massa total das telhas (kg)	Massa total das terças (kg)	Massa total dos tirantes em X (kg)	Massa total dos tirantes em Y (kg)	Massa total das mãos-francesas (kg)	Massa total das treliças (kg)	Massa total da cobertura (kg)
10	1961,55	1100,13	73,60	226,70	110,49	1076,21	4548,68
11	2120,62	1100,13	75,11	240,63	110,39	1423,48	5070,36
12	2330,87	1100,13	74,10	272,71	133,85	1662,21	5573,87
13	2512,28	1386,47	86,75	247,42	247,42	1749,27	6229,61
14	2733,01	1386,47	89,03	264,66	114,93	2159,87	6747,97
15	2901,86	1650,20	125,80	279,56	172,50	1944,28	7074,20
16	3072,90	1650,20	127,20	292,45	162,64	2341,64	7647,03
17	3270,11	1650,20	122,68	324,10	173,48	2721,11	8261,68
18	3472,16	1650,20	124,58	340,72	196,96	2918,86	8703,48
19	3670,60	1650,20	121,21	376,66	236,76	3219,77	9275,20
20	3856,97	1925,23	146,60	367,37	281,49	3248,19	9825,85
21	4036,54	1925,23	148,26	381,87	240,78	3743,50	10476,18
22	4243,44	2079,70	145,15	360,54	215,54	4041,97	11086,34
23	4417,37	1925,23	145,58	435,90	292,77	4613,37	11830,22
24	4613,12	1925,23	147,67	453,01	277,52	5181,83	12598,38
25	4987,32	2426,32	193,91	408,31	345,21	5020,71	13381,78
26	5024,57	1925,23	147,25	514,13	408,64	5936,31	13956,13
27	5204,67	2475,30	196,03	467,97	565,30	5785,66	14694,93
28	5393,65	2475,30	189,05	510,30	591,34	6295,51	15455,15
29	5606,76	2927,41	199,83	395,53	326,19	7053,95	16509,67
30	5774,93	2475,30	179,01	601,46	649,82	7390,17	17070,69
31	5762,28	3119,55	235,47	427,01	444,10	7380,10	17368,51
32	5959,87	2927,41	276,77	417,11	254,00	8785,69	18620,85
33	6155,37	3119,55	226,03	656,26	656,26	8748,25	19561,72
34	6326,78	3466,17	263,59	460,73	478,61	8985,16	19981,04
35	6517,82	3763,81	275,80	411,35	362,95	9612,67	20944,40
36	6713,35	3119,55	231,47	520,97	382,02	11251,91	22219,27
37	6915,87	2750,33	248,05	635,33	614,05	11560,25	22723,88
38	7294,69	3466,17	257,85	557,76	562,85	12413,69	24553,01
39	7477,07	3812,79	296,69	531,52	555,07	12988,57	25661,71
40	7666,67	3466,17	261,56	261,56	547,58	14118,06	26321,60

Tabela 20 – Resultados para o modelo 2 - Custos totais

Largura do galpão (m)	Custo total das telhas (R\$)	Custo total das terças (R\$)	Custo total dos tirantes em X (R\$)	Custo total dos tirantes em Y (R\$)	Custo total das mãos-francesas (R\$)	Custo total das treliças (R\$)	Custo total da cobertura (R\$)
10	8787,78	3905,47	295,15	909,08	353,59	3443,90	17694,99
11	9500,40	3905,47	301,21	964,95	353,27	4555,13	19580,45
12	10442,31	3905,47	297,14	1093,59	428,32	5319,09	21485,95
13	11255,04	4921,97	347,86	992,15	308,99	5597,66	23423,70
14	12243,88	4921,97	357,01	1061,31	367,77	6911,58	25863,55
15	13000,37	5858,21	504,47	1121,05	552,02	6221,72	27257,87
16	13766,59	5858,21	510,08	1172,72	520,45	7493,27	29321,35
17	14650,12	5858,21	491,94	1299,67	555,15	8707,57	31562,69
18	15555,30	5858,21	499,59	1366,30	630,28	9340,35	33250,06
19	16444,31	5858,21	486,05	1510,43	757,64	10303,27	35359,93
20	17279,25	6834,58	587,86	1473,16	900,77	10394,22	37469,87
21	18083,72	6834,58	594,54	1531,30	770,49	11979,22	39793,88
22	19010,64	7382,95	582,05	1445,78	689,73	12934,31	42045,49
23	19789,84	6834,58	583,79	1747,96	936,86	14762,78	44655,83
24	20666,82	6834,58	592,16	1816,60	888,08	16581,86	47380,13
25	22343,21	8613,45	777,60	1637,34	1104,67	16066,30	50542,59
26	22510,08	6834,58	590,50	2061,67	1307,65	18996,22	52300,73
27	23316,96	8787,32	786,10	1876,57	1808,96	18514,12	55090,04
28	24163,56	8787,32	758,11	2046,33	1892,30	20145,63	57793,27
29	25118,30	10392,31	801,34	1586,10	1043,81	22572,66	61514,54
30	25871,68	8787,32	717,83	2411,86	2079,42	23648,57	63516,71
31	25815,03	11074,43	944,24	1712,34	1421,15	23616,33	64583,54
32	26700,23	10392,31	1109,86	1672,62	812,83	28114,23	68802,11
33	27576,07	11074,43	906,41	2631,61	1441,76	27994,40	71624,70
34	28343,99	12304,92	1057,03	1847,55	1531,55	28752,53	73837,60
35	29199,87	13361,54	1105,98	1649,54	1161,46	30760,55	77238,96
36	30075,85	11074,43	928,21	2089,12	1222,49	36006,13	81396,25
37	30983,13	9763,69	994,72	2547,69	1964,96	36992,81	83247,02
38	32680,25	12304,92	1033,98	2236,64	1801,15	39723,82	89780,78
39	33497,30	13535,42	1189,76	2131,40	1776,23	41563,44	93693,56
40	34346,70	12304,92	1048,85	2339,91	1752,26	45177,80	96970,47



## C.3 Modelo 3

Tabela 21 – Resultados para o modelo 3 - Índice das barras da treliça

Largura do galpão (m)	Índice do perfil do banzo inferior	Índice do perfil do banzo superior	Índice do perfil da barra 1 da treliça	Índice do perfil da barra 2 da treliça	Índice do perfil da barra 3 da treliça	Índice do perfil da barra 4 da treliça	Índice do perfil da barra 5 da treliça	Índice do perfil da barra 6 da treliça	Índice do perfil da barra 7 da treliça	Índice do perfil da barra 8 da treliça	Índice do perfil da barra 9 da treliça	Índice do perfil da barra 10 da treliça	Índice do perfil da barra 11 da treliça	Índice do perfil da barra 12 da treliça	Índice do perfil da barra 13 da treliça	Índice do perfil da barra 14 da treliça	Índice do perfil da barra 15 da treliça
10	1	4	1	1	1	1	2	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	2	5	1	1	1	2	3	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	2	5	1	5	1	6	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13	5	7	1	3	5	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	2	5	1	1	1	3	1	2	1	3	1	3	2	-	-	-	-
15	3	7	1	7	1	7	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16	5	7	1	1	3	5	6	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
17	4	7	1	1	1	2	2	3	4	3	5	1	-	-	-	-	-
18	5	7	1	1	2	3	5	5	5	6	-	-	-	-	-	-	-
19	3	7	1	5	1	5	1	5	1	5	1	5	3	-	-	-	-
20	4	8	1	1	1	4	1	3	1	4	1	4	1	5	2	5	4
21	4	7	1	1	1	4	1	3	1	4	1	4	2	5	3	4	4
22	4	8	1	6	1	6	1	6	2	6	2	7	5	-	-	-	-
23	5	8	1	7	3	7	4	8	5	8	8	-	-	-	-	-	-
24	5	8	1	7	1	7	2	7	4	8	7	-	-	-	-	-	-
25	5	9	1	6	1	6	1	6	2	7	3	7	4	7	7	-	-
26	7	10	1	1	2	3	5	7	7	7	7	8	-	-	-	-	-
27	5	9	1	6	1	6	1	7	1	7	2	7	3	7	6	-	-
28	7	10	1	1	2	4	5	7	7	7	7	8	-	-	-	-	-
29	6	10	3	7	4	7	1	7	2	7	2	8	4	8	6	-	-
30	7	11	1	1	2	3	4	6	7	7	7	7	7	8	-	-	-
31	7	11	1	1	2	3	4	6	7	7	7	7	7	8	-	-	-
32	7	10	1	7	2	7	1	8	2	8	4	8	5	8	8	-	-
33	6	10	1	7	1	7	1	7	1	7	2	7	3	7	4	8	6
34	8	11	1	1	2	4	5	7	8	8	8	8	8	8	8	8	-
35	7	11	2	8	1	8	1	8	3	8	4	9	5	9	8	9	-
36	7	11	4	8	1	8	2	8	3	8	4	9	6	9	8	-	-
37	7	11	8	8	1	8	2	8	3	9	5	9	6	10	8	-	-
38	7	11	1	8	1	8	2	8	3	9	5	9	6	10	8	-	-
39	8	14	2	1	2	3	5	6	7	8	8	8	8	8	8	8	-
40	8	12	1	2	3	5	6	7	8	8	8	8	9	9	-	-	-

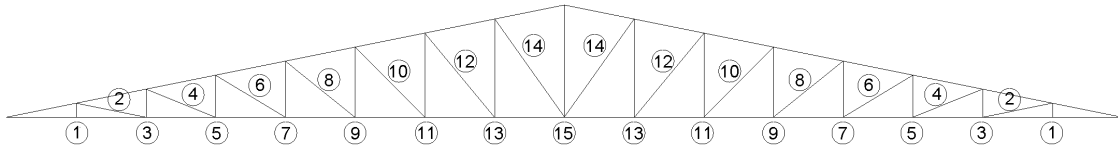


Figura 59 – Numeração das barras das diagonais e montantes da treliça

Tabela 22 – Resultados para o modelo 3 - Índice das variáveis

Largura do galpão (m)	Índice das telhas	Índice das terças	Índice dos tirantes em X	Índice dos tirantes em Y	Índice das mãos-francesas	Inclinação do telhado (%)	Número de terças (un)	Espaçamento entre terças (m)	Número de travamentos (un)	Distância entre pórticos (m)	Número de divisões de um banzo inferior	Modelo de topologia
10	1	1	1	1	2	13,8	6	1,72	4	2,52	7	1
11	1	3	1	1	2	13,8	6	1,89	4	3,20	7	1
12	1	3	1	1	3	17,0	8	1,57	6	3,69	6	2
13	1	5	1	1	1	9,4	8	1,65	6	4,36	5	1
14	1	3	1	1	4	16,2	8	1,82	6	2,67	12	2
15	1	5	1	1	3	13,6	8	1,93	6	4,00	6	2
16	1	3	1	1	2	9,4	10	1,62	8	3,69	7	1
17	1	5	1	1	3	9,6	8	2,16	6	3,69	11	1
18	1	3	1	1	2	10,9	12	1,53	10	3,69	9	1
19	1	1	1	1	2	9,3	14	1,38	12	3,20	12	2
20	1	5	1	1	3	9,8	10	2,03	8	4,00	16	2
21	1	3	1	1	4	11,1	10	2,14	8	3,20	16	2
22	1	3	1	1	4	10,7	14	1,60	12	3,69	12	2
23	1	5	4	1	5	12,5	12	1,96	10	4,00	10	2
24	1	5	2	1	7	14,2	12	2,06	10	4,00	10	2
25	1	5	1	1	5	10,9	16	1,59	14	4,36	14	2
26	1	5	1	1	4	8,6	14	1,88	12	3,43	11	1
27	1	3	1	1	5	9,8	16	1,71	14	3,43	14	2
28	1	5	1	1	4	8,9	14	2,02	12	4,00	11	1
29	1	4	1	1	5	9,1	16	1,84	14	4,00	14	2
30	1	5	1	1	5	9,1	16	1,90	14	4,36	13	1
31	1	5	2	2	5	8,7	16	1,96	14	4,00	13	1
32	1	5	2	3	7	10,7	16	2,04	14	4,00	14	2
33	1	3	2	1	5	8,4	18	1,85	16	3,20	16	2
34	1	5	3	1	7	9,8	16	2,16	14	4,00	13	1
35	1	5	1	1	8	10,0	16	2,22	14	4,00	14	2
36	1	6	2	5	8	10,5	16	2,29	14	4,00	14	2
37	1	6	1	1	8	10,9	16	2,35	14	4,00	14	2
38	1	5	4	4	8	10,5	16	2,42	14	3,69	14	2
39	1	6	1	1	7	8,3	16	2,46	14	4,36	15	1
40	1	5	1	3	8	9,5	16	2,53	14	3,69	13	1

Tabela 23 – Resultados para o modelo 3 - Massas totais

Largura do galpão (m)	Massa total das telhas (kg)	Massa total das terças (kg)	Massa total dos tirantes em X (kg)	Massa total dos tirantes em Y (kg)	Massa total das mãos-francesas (kg)	Massa total das treliças (kg)	Massa total da cobertura (kg)
10	1926,34	825,10	50,65	276,12	112,62	1557,48	4748,31
11	2119,02	1039,85	60,17	244,59	97,69	1624,02	5185,34
12	2322,76	1386,47	89,71	220,36	205,01	1749,34	5973,65
13	2491,63	1672,80	103,81	205,48	66,19	2521,28	7061,19
14	2706,75	1386,47	88,75	262,60	287,94	2142,09	6874,60
15	2888,73	1672,80	100,75	244,69	189,12	3162,26	8258,35
16	3066,59	1733,08	119,34	265,16	167,20	3697,67	9049,04
17	3262,57	1672,80	99,32	288,42	182,90	3628,64	9134,65
18	3451,61	2079,70	145,92	286,43	248,02	4102,52	10314,20
19	3641,21	1925,23	152,25	331,88	339,35	4638,84	11028,76
20	3834,79	2091,00	134,17	297,37	242,28	4636,68	11236,29
21	4032,14	1733,08	117,86	375,50	422,35	5388,77	12069,70
22	4222,25	2426,32	175,76	333,40	554,09	5920,13	13631,95
23	4423,26	2509,21	223,43	327,99	594,62	6317,04	14395,55
24	4625,54	2509,21	186,01	340,47	1313,39	6529,31	15503,93
25	4798,79	3345,61	234,41	321,08	721,30	7246,02	16667,21
26	4979,84	2927,41	207,60	332,90	445,10	9404,30	18297,15
27	5176,86	2772,94	195,84	417,45	889,91	9720,04	19173,04
28	5364,37	2927,41	197,52	380,79	541,47	10986,85	20398,41
29	5556,82	3309,44	224,12	388,84	763,10	11101,75	21344,07
30	5748,25	3345,61	241,70	372,07	721,30	11931,43	22360,36
31	5937,99	3345,61	254,79	460,94	780,44	13322,49	24102,26
32	6141,60	3345,61	256,88	520,48	1860,38	13332,11	25457,06
33	6319,23	3119,55	242,51	525,17	1139,69	15506,86	26853,01
34	6518,93	3345,61	286,12	446,36	1795,48	15874,76	28267,26
35	6712,59	3345,61	234,82	458,02	2307,35	16081,74	29140,13
36	6907,49	3996,65	265,20	665,28	2477,78	16640,05	30952,45
37	7102,51	3996,65	238,76	481,60	2648,21	17416,30	31884,03
38	7291,43	3345,61	280,27	530,36	2842,26	19193,92	33483,85
39	7467,83	4496,23	284,02	462,73	1837,19	22025,93	36573,93
40	7667,39	3345,61	232,39	682,12	2700,15	23063,71	37691,37

Tabela 24 – Resultados para o modelo 3 - Custos totais

Largura do galpão (m)	Custo total das telhas (R\$)	Custo total das terças (R\$)	Custo total dos tirantes em X (R\$)	Custo total dos tirantes em Y (R\$)	Custo total das mãos-francesas (R\$)	Custo total das treliças (R\$)	Custo total da cobertura (R\$)
10	8630,01	2929,10	203,12	1107,27	360,40	4983,94	18213,87
11	9493,24	3691,47	241,28	980,83	312,61	5196,87	19916,33
12	10405,97	4921,97	359,75	883,67	656,05	5597,89	22825,31
13	11162,52	5938,46	416,31	824,00	211,82	8068,11	26621,23
14	12126,26	4921,97	355,89	1053,04	921,42	6854,70	26233,30
15	12941,53	5938,46	404,03	981,22	605,21	10119,23	30989,70
16	13738,36	6152,46	478,58	1063,29	535,06	11832,57	33800,34
17	14616,33	5938,46	398,30	1156,56	585,30	11611,65	34306,63
18	15463,24	7382,95	585,14	1148,61	793,68	13128,08	38501,73
19	16312,62	6834,58	610,56	1330,85	1085,92	14844,30	41018,84
20	17179,89	7423,08	538,04	1192,46	775,30	14837,40	41946,19
21	18063,99	6152,46	472,64	1505,75	1351,52	17244,08	44790,46
22	18915,68	8613,45	704,83	1336,94	1773,10	18944,44	50288,46
23	19816,22	8907,69	895,99	1315,24	1902,79	20214,54	53052,50
24	20722,44	8907,69	745,93	1365,31	4202,85	20893,81	56838,06
25	21498,60	11876,93	940,01	1287,53	2308,18	23187,27	61098,54
26	22309,71	10392,31	832,51	1334,95	1424,32	30093,77	66387,60
27	23192,35	9843,94	785,32	1674,00	2847,72	31104,15	69447,49
28	24032,39	10392,31	792,05	1527,00	1732,72	35157,94	73634,43
29	24894,59	11748,53	898,74	1559,25	2441,92	35525,60	77068,65
30	25752,17	11876,93	969,22	1492,02	2308,18	38180,60	80579,13
31	26602,20	11876,93	1021,74	1848,38	2497,41	42631,98	86478,67
32	27514,38	11876,93	1030,11	2087,13	5953,22	42662,78	91124,58
33	28310,16	11074,43	972,48	2105,94	3647,02	49621,97	95732,02
34	29204,81	11876,93	1147,37	1789,90	5745,55	50799,23	100563,82
35	30072,40	11876,93	941,64	1836,69	7383,52	51461,58	103572,79
36	30945,55	14188,11	1063,46	2667,79	7928,90	53248,17	110042,00
37	31819,26	14188,11	957,43	1931,23	8474,27	55732,19	113102,53
38	32665,64	11876,93	1123,90	2126,76	9095,25	61420,57	118309,07
39	33455,92	15961,63	1138,93	1855,56	5879,01	70482,98	128774,06
40	34349,92	11876,93	931,88	2735,31	8640,49	73803,90	132338,45

## APÊNDICE D – Exemplo de um galpão otimizado

Nesta seção, é mostrada a geometria de um galpão com vão transversal de 20 metros, após otimização.

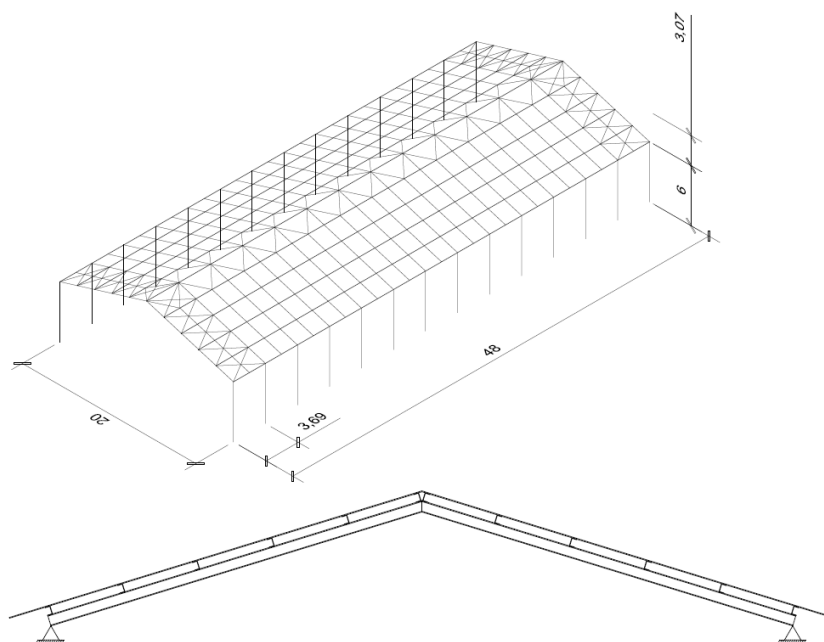


Figura 60 – Galpão otimizado - Modelo 1

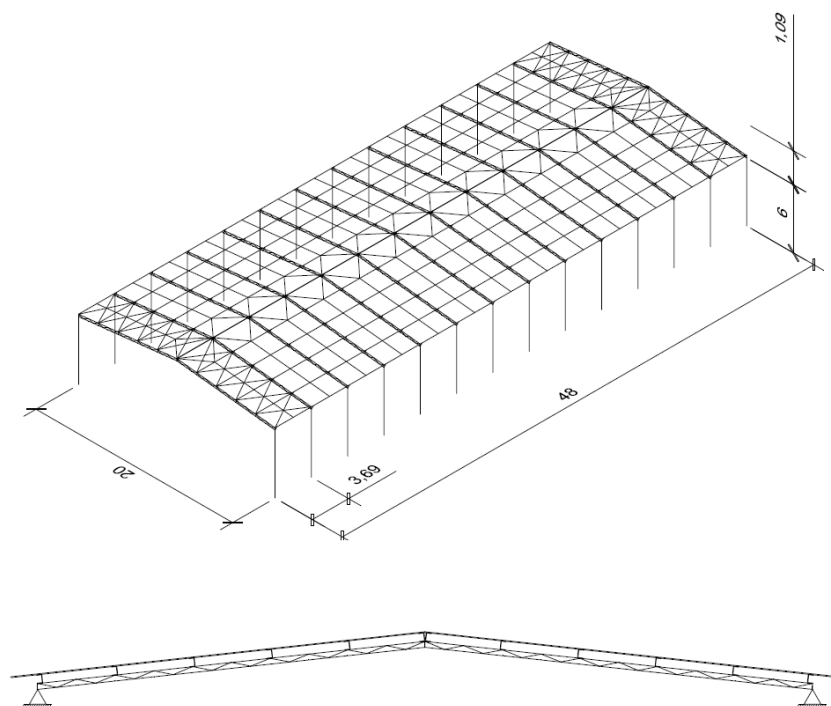


Figura 61 – Galpão otimizado - Modelo 2

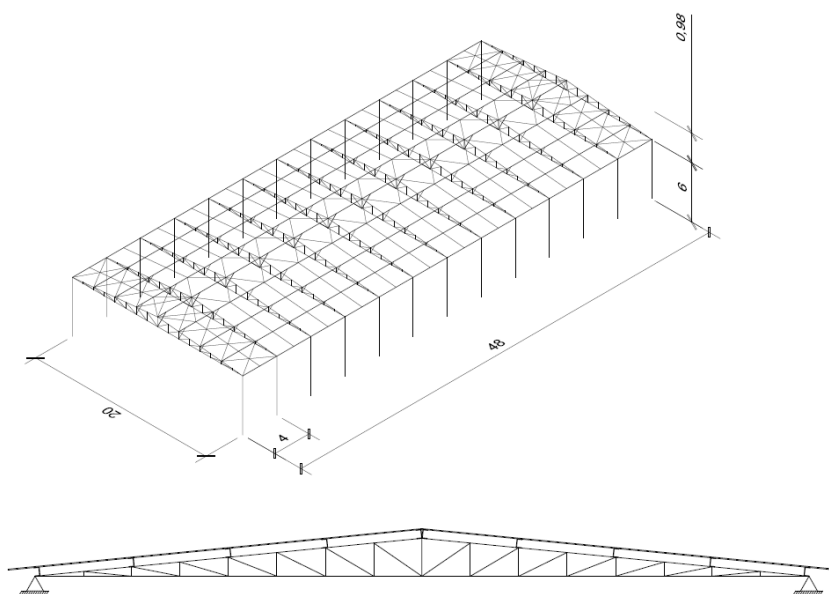


Figura 62 – Galpão otimizado - Modelo 3